

E. BĂDĂRĂU

M. GRUMĂZESCU

ULTRACUSTICA

FIZICĂ ȘI TEHNICĂ



Acad. EUGEN BĂDĂRĂU

Ing. MIRCEA GRUMĂZESCU

ULTRACUSTICA

FIZICĂ ȘI TEHNICĂ

EDITURA TEHNICĂ
BUCUREȘTI-1967



Lucrarea conține: noțiuni fundamentale în ultraacustică, producerea ultrasunetelor, propagarea undelor ultrasonice, studiul câmpului ultrasonic, aplicațiile ultrasunetelor de intensități mici, aplicațiile ultrasunetelor de intensități mari în tehnică.

Se adresează inginerilor, fizicienilor, cadrelor didactice din învățământul superior și mediu, cercetătorilor științifici care folosesc în lucrările lor metode ultrasonore, precum și studenților din disciplina menționată sau înrudite cu ea.

PREFAȚĂ

Știința, devenită forță de producție, contribuie tot mai substanțial în prezent la progresul tehnic și la dezvoltarea economiei naționale. Printre științele care aduc o largă contribuție în această privință se numără și acustica, un capitol vechi al fizicii, transformată însă în ultimele decenii într-o disciplină complexă și mult ramificată. Metodele acustice constituie azi metode de bază pentru cunoașterea naturii, pentru efectuarea unor procese tehnologice, pentru controlul calității produselor industriale, pentru măsurarea unor parametri fizici și geometrici. Aceste largi posibilități se datoresc în mare măsură creării și dezvoltării acelei ramuri a acusticii, care studiază și aplică vibrațiile și undele ultrasonice și hipersonice, a ultraacusticii.

Ținând seama de rolul pe care-l deține ultraacustica în dezvoltarea economiei naționale și în introducerea tehnicii noi în producție, cercetările științifice din domeniul ultraacusticii și aplicarea metodelor ultrasonice, în special a celor de măsurare și de control, au cunoscut în ultimul timp în țara noastră o destul de mare extindere. Sub impulsul imprimat de Comisia de acustică a Academiei Republicii Socialiste România, tot mai multe colective au abordat teme din domeniul ultraacusticii și tot mai variate ramuri industriale aplică cu bune rezultate metode de prelucrare a materialelor, de măsurare sau de control cu ultrasunete.

Intensa activitate teoretică și practică ce se desfășoară în această direcție, în care sînt antrenați fizicieni, chimiști, ingineri, tehnicieni a făcut necesară apariția unei lucrări care să cuprindă principiile de bază ale ultraacusticii și aplicațiile moderne ale ultrasunetelor. Pentru a răspunde acestei necesități, am redactat lucrarea de față, în care am căutat să dezvoltăm teoriile fizice fundamentale și să cuprindem un număr cît mai mare și mai variat de aplicații, atît ale ultrasunetelor de intensități mari, cît și a celor de intensități reduse. În plus, am introdus și noțiuni

de acustică moleculară, ramură nouă a acusticii, care folosește ultrasunete de frecvențe ridicate pentru cercetarea structurii materiei.

La redactarea lucrării am ținut seama de cele mai noi studii teoretice și experimentale efectuate atât în țară, cât și în străinătate. Literatura de specialitate consultată și care poate folosi cititorului pentru aprofundarea unor probleme a fost ordonată pe domenii, fiind indicată la sfârșitul fiecărui capitol.

Autorii țin să aducă mulțumiri dr. ing. I. Făcăoaru pentru concursul acordat la revizuirea textului manuscrisului și pentru unele indicații prețioase furnizate.

AUTORII

TABLA DE MATERII

1. VIBRAȚII ȘI UNDE

1.1. Vibrația sistemelor elastice. Rezonanța	9
1.1.1. Vibrații libere	9
1.1.2. Vibrații forțate. Rezonanță	11
1.2. Unde acustice	14
1.2.1. Tipuri de unde	14
1.2.2. Unde longitudinale plane. Ecuația undelor	18
1.3. Mărimi acustice	21
1.3.1. Impedanța acustică specifică	21
1.3.2. Densitatea de energie acustică. Intensitatea acustică	22
1.4. Radiatori acustici	24
1.4.1. Sfera pulsantă	24
1.4.2. Pistonul vibrant	26
1.5. Reflexia și refracția undelor plane	30
1.5.1. Reflexia și transmisia undelor sub incidență normală	30
1.5.2. Reflexia și refracția undelor sub incidență oblică	34
1.6. Unde staționare	38
1.6.1. Unde staționare în medii nelimitate	38
1.6.2. Unde staționare în medii limitate	40
1.7. Difracția și difuzia undelor acustice	43
1.8. Presiunea de radiație acustică	47
1.9. Atenuarea energiei acustice	50
Bibliografie	52

2. PRODUCEREA ULTRASUNETELOR

2.1. Generalități	54
2.2. Emițătoare mecanice	54
2.2.1. Fluiere ultrasonice	54
2.2.2. Sirene ultrasonice	59
2.3. Emițătoare electromecanice	62
2.3.1. Emițătorul piezoelectric	62
2.3.2. Emițătorul magnetostrictiv	75
2.3.3. Emițătorul electromagnetic	85
2.3.4. Emițătoare de hipersunete	88
2.4. Adaptarea emițătorului la mediu	90
2.5. Concentratoare de energie ultrasonică	94

2.5.1. Reflectori acustici	97
2.5.2. Lentile acustice	99
2.6. Transformatoare acustice	103
Bibliografie	109
3. PROPAGAREA ULTRASUNETELOR	
3.1. Propagarea ultrasunetelor în gaze	112
3.1.1. Viteza de propagare a undei acustice. Dispersia	113
3.1.2. Atenuarea undelor acustice în gaze	122
3.2. Propagarea ultrasunetelor în lichide	130
3.2.1. Viteza și absorbția undelor acustice	130
3.2.2. Cavitația acustică	138
3.2.3. Dispersia ultrasonică	154
3.3. Propagarea ultrasunetelor în solide	156
3.3.1. Viteza de propagare a undei	156
3.3.2. Atenuarea undelor ultrasonice în medii solide	158
3.3.3. Amplificarea ultrasunetelor	165
Bibliografie	168
4. STUDIUL CÎMPULUI ULTRASONIC	
4.1. Detecția ultrasunetelor	172
4.1.1. Metode mecanice	172
4.1.2. Metode termice	181
4.1.3. Metode optice	183
4.1.4. Vizualizarea cîmpului ultrasonic	187
4.1.5. Încăperi speciale pentru măsurări acustice în lichide	191
4.2. Măsurarea constantelor de propagare a undelor	192
4.2.1. Măsurarea vitezei undelor longitudinale	192
4.2.2. Măsurarea atenuării undelor longitudinale	203
Bibliografie	212
5. APLICAȚIILE ULTRASUNETELOR ÎN TEHNICA	
5.1. Generalități	215
5.2. Aplicații active în tehnică	216
5.2.1. Prelucrarea mecanică cu ajutorul ultrasunetelor	216
5.2.2. Curățirea cu ajutorul ultrasunetelor	223
5.2.3. Tratatamentul cu ultrasunete al metalelor topite	233
5.2.4. Sudarea cu ajutorul ultrasunetelor	239
5.2.5. Depunerea particulelor cu ajutorul ultrasunetelor	246
5.2.6. Formarea emulsiilor cu ajutorul ultrasunetelor	255
5.2.7. Acțiunea ultrasunetelor asupra polimerilor	264
5.2.8. Uscarea cu ajutorul ultrasunetelor	267
5.3. Aplicații pasive în tehnică	270
5.3.1. Defectoscopia ultrasonică	271
5.3.2. Determinarea proprietăților elastice și de structură ale materialelor	284
5.3.3. Determinarea parametrilor fizici în fluide	292
5.3.4. Măsurarea grosimilor cu ajutorul ultrasunetelor	297
5.3.5. Sondajul și reperajul submarin	300
5.3.6. Linii de întârziere cu ultrasunete	303
Bibliografie	310

1

VIBRAȚII ȘI UNDE

1.1. VIBRAȚIA SISTEMELOR ELASTICE. REZONANȚA

1.1.1. **Vibrații libere.** Producerea undelor acustice și propagarea lor printr-un mediu elastic sînt determinate, pe de o parte, de vibrația unui corp, devenit sursă acustică și, pe de altă parte, de vibrația particulelor mediului prin care trece unda. Vibrațiile pot fi efectuate în diferite moduri, însă în cazul cel mai simplu ele pot fi considerate analoge cu cele produse de un corp redus la un punct material, avînd masa M , suspendat de un resort de masă neglijabilă și rigiditate k . Se consideră că în timpul mișcării, punctul material întîmpină o rezistență dată de o forță de frecare vîscoasă, proporțională cu viteza sa de deplasare, factorul de proporționalitate fiind R_m — rezistența mecanică a sistemului. În această situație, punctul material efectuează vibrații libere de o parte și de alta a poziției sale de repaus, amplitudinile deplasărilor fiind presupuse mici. Ecuația unei astfel de mișcări poate fi exprimată printr-o ecuație diferențială liniară de ordinul al doilea

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = 0. \quad (1.1)$$

Notînd

$$\frac{R_m}{2M} = \delta \quad (1.2)$$

care este factorul de amortizare și

$$\frac{k}{M} = \omega_0^2 \quad (1.3)$$

care e pulsația proprie a sistemului ce vibrează, soluția ecuației (1.1) are forma

$$x = X_0 e^{-\delta t} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t. \quad (1.4)$$

Admițând că $\delta < \omega_0$ (cazul unei forțe de frecare reduse), punctul material are o mișcare vibratorie amortizată, a cărei amplitudine

$$X = X_0 e^{-\delta t} \quad (1.5)$$

descrește proporțional cu timpul. Mișcarea este reprezentată în fig. 1.1, înfășurătoarele fiind exponențialele corespunzătoare funcției (1.5), afectate cu semnul $\pm$.

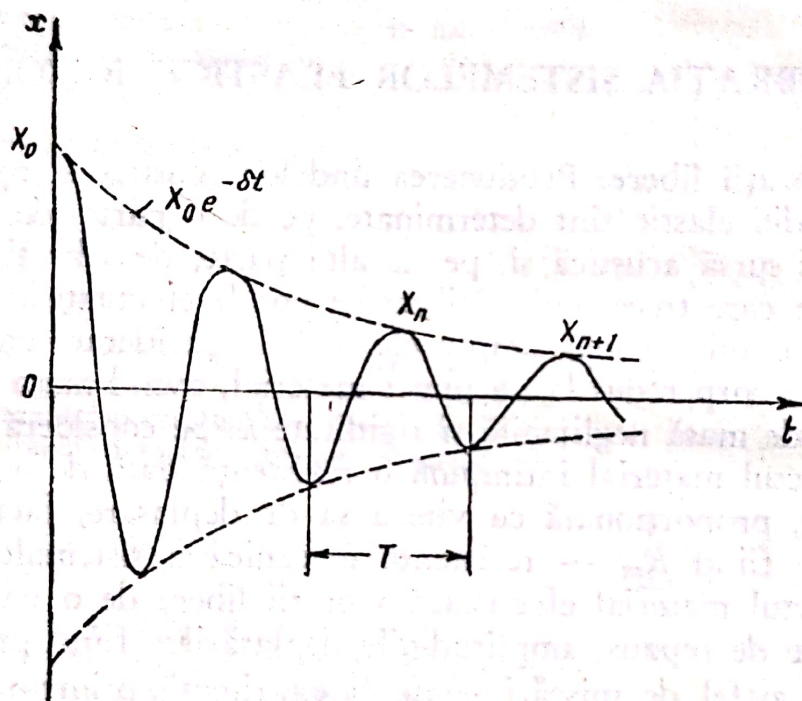


Fig. 1.1. Diagrama mișcării vibratorie amortizată.

Amortizarea mișcării poate fi caracterizată prin decrementul logaritm (Δ), definit ca logaritmul natural al raportului a două amplitudini considerate la două momente separate printr-o perioadă, adică

$$\Delta = \ln \frac{X_{n+1}}{X_n} = \ln e^{-\delta T} = -\delta T. \quad (1.6)$$

Ținând seama de expresia lui δ , dată de relația (1.2), rezultă că, cu cât rezistența mecanică este mai mică și masa punctului material mai

mare, cu atât decrementul logaritmic este mai mic, cu alte cuvinte amortizarea vibrațiilor se produce într-un interval de timp mai mare. Pe de altă parte, decrementul logaritmic fiind în funcție de perioada vibrației, rezultă că, pentru aceeași rezistență mecanică, două sisteme de mase egale se amortizează în mod diferit și anume sistemul care are o frecvență proprie mai ridicată este caracterizat printr-un decrement logaritmic mai mic, deci se amortizează mai încet decât un sistem la care frecvența proprie de vibrație este mai coborâtă.

1.1.2. Vibrații forțate. Rezonanță. În cazul când asupra punctului material acționează în timpul mișcării o forță excitatoare periodică $F = F_0 \cdot \cos \omega_1 t$, avînd frecvența $f_1 = \omega_1 / 2\pi$, ecuația diferențială a mișcării devine

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega_1 t. \quad (1.7)$$

Soluția acestei ecuații este o sumă formată dintr-o parte rezultată prin integrarea ecuației diferențiale fără membrul al doilea indicată la (1.4) și o a doua parte reprezentînd o soluție particulară a ecuației cu termenul liber și anume

$$x = X_0 e^{-\delta t} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + X \cos (\omega_1 t + \varphi). \quad (1.8)$$

Primul termen din membrul doi al acestei relații definește starea tranzitorie a mișcării. Valoarea acestui termen scăzînd în funcție de timp, după un interval de timp oarecare ea devine atât de mică încît poate fi neglijată. În acest caz, expresia (1.8) se reduce numai la a doua parte, care definește starea staționară a mișcării. În această relație, din condițiile inițiale și din ecuația (1.7), rezultă

$$X = \frac{F_0}{\omega_1 \sqrt{R_m^2 + \left(\frac{k}{\omega_1} - M\omega_1\right)^2}} \quad (1.9)$$

care reprezintă amplitudinea vibrațiilor forțate și

$$\varphi = \arctg \frac{M\omega_1^2 - k}{R_m \omega_1} \quad (1.10)$$

care este defazajul dintre forța excitatoare și viteza oscilației forțate.

Cantitatea de sub radicalul expresiei (1.9) reprezintă pătratul modului impedanței mecanice a sistemului în vibrație

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + \left(\frac{k}{\omega_1} - M\omega_1\right)^2} = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} \quad (1.11)$$

unde R_m este rezistența mecanică, iar X_m este reactanța mecanică.

Ținând seama de relația (1.3), expresia (1.9) se mai poate scrie

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{R_m}{k} \omega_1\right)^2}} \quad (1.12)$$

Notînd cu R_{cr} rezistența mecanică la care se obține amortizarea critică dată de relația

$$R_{cr} = 2M\omega_0 = 2\sqrt{Mk} \quad (1.13)$$

expresia (1.12) devine

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2 \frac{R_m}{R_{cr}} \frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2}} \quad (1.14)$$

Curbele de variație a amplitudinii vibrațiilor forțate, în funcție de raportul ω_1/ω_0 dintre pulsația forței excitatoare și pulsația proprie a

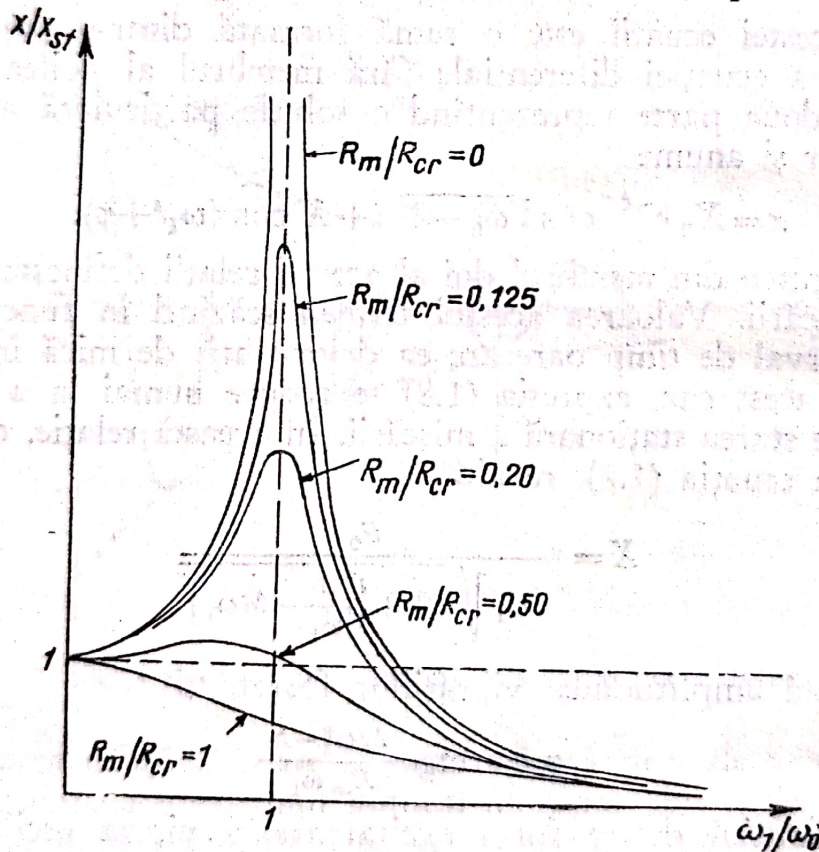


Fig. 1.2. Curbe de rezonanță corespunzătoare diferitelor valori ale raportului R_m/R_{cr} .

sistemului care vibrează, pentru diferite valori ale raportului R_m/R_{cr} , sînt indicate în fig. 1.2. Din examinarea diagramei se constată că valorile amplitudinilor vibrațiilor forțate ating un maxim egal cu $F_0/R_m\omega_0$ atunci

cînd $\omega_1/\omega_0=1$, cu alte cuvinte atunci cînd frecvența forței excitatoare devine egală cu frecvența proprie a sistemului care vibrează. În această situație apare fenomenul de rezonanță. În cazul particular al unei mișcări periodice neamortizate ($R_m=0$) și, în consecință, la rezonanță amplitudinea vibrațiilor devine infinită.

Modul de comportare la rezonanță a unui sistem vibrant poate fi caracterizat prin factorul de calitate (Q_m), care este definit de raportul

$$Q_m = \frac{\omega_r M}{R_m} = \frac{\pi f_r}{\delta} \quad (1.15)$$

unde ω_r reprezintă pulsația corespunzătoare frecvenței de rezonanță, iar δ este dat de (1.2).

Cu cît valoarea lui R_m este mai mică, deci și factorul de amortizare δ este mai mic, cu atît mai ridicată este valoarea factorului de calitate și, ca urmare, mai ascuțită apare forma curbei de rezonanță.

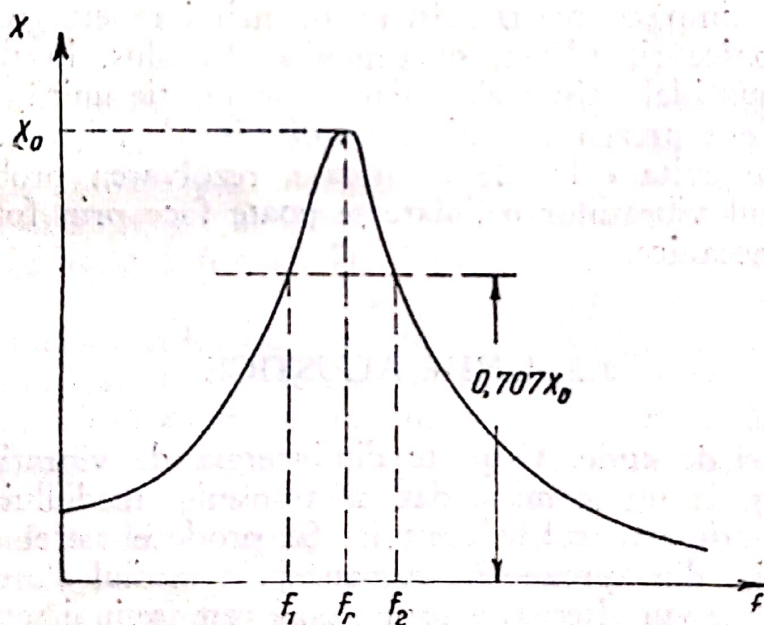


Fig. 1.3. Determinarea factorului de calitate din curba de rezonanță.

Dacă de o parte și de alta a frecvenței de rezonanță se iau două frecvențe (f_1 și f_2) pentru care amplitudinea vibrațiilor devine egală cu $\frac{\sqrt{2}}{2}=0,707$ din amplitudinea vibrațiilor la rezonanță (fig. 1.3), factorul de calitate mai poate fi exprimat prin relația

$$Q_m = \frac{f_r}{f_1 - f_2} = \frac{\omega_r}{\omega_1 - \omega_2} \quad (1.16)$$

În cele de mai sus s-a făcut ipoteza că punctul material are o mișcare vibratorie cu amplitudini mici ale deplasării. Studiarea mișcării s-a făcut în acest caz cu ajutorul ecuațiilor diferențiale liniare, pentru care motiv asemenea vibrații se mai numesc și vibrații liniare. În alte cazuri, însă, mișcarea punctului material nu mai poate fi considerată că se produce cu amplitudini mici ale deplasării de o parte și de alta a poziției de repaus, ci cu deplasări pronunțate, denumite, de amplitudine finită. Studiul mișcării de această dată comportă un aparat matematic mai complicat, făcându-se apel la ecuații diferențiale neliniare sau, în general, la ecuații integrodiferențiale neliniare și la ecuații funcționale neliniare. În cuprinsul acestei cărți nu va fi dezvoltată teoria vibrațiilor neliniare, însă datorită faptului că ele intervin în unele procese în care se folosesc ultrasunete de intensități mari, vor fi menționate unele caracteristici ale acestora în raport cu vibrațiile liniare. Astfel, în urma aplicării unei perturbații sinusoidale, reacția sistemelor liniare se caracterizează tot printr-o curbă sinusoidală, în timp ce reacția sistemelor neliniare este mai complexă, incluzând armonice și, adesea, subarmonice. În plus, în urma aplicării perturbației sinusoidale, sistemele liniare au o reacție unică, pe când sistemele neliniare pot prezenta câteva stări diferite de mișcare.

Pentru a se evita calculele laborioase, rezolvarea problemelor care intervin în cazul vibrațiilor neliniare se poate face prin folosirea analogiilor electro-mecanice.

1.2. UNDE ACUSTICE

1.2.1. Tipuri de unde. O parte din energia de vibrație, pe care o posedă un corp la un moment dat, se transmite mediului înconjurător punând în vibrație particulele acestuia. Se produce astfel o perturbație care se transmite din aproape în aproape prin mediul elastic, creîndu-se unde elastice, care iau alternativ forma unei compresiuni sau a unei rarefierii (expansiuni). Datorită faptului că modul în care se poate produce o perturbație într-un mediu elastic poate diferi de la caz la caz, undele elastice sînt și ele de diferite tipuri. Undele acustice reprezintă o categorie de unde elastice.

Dacă undele acustice au frecvențe care le fac să impresioneze organul auditiv al omului, producînd senzația de auz; ele se mai numesc și unde sonore. Dacă însă frecvența lor depășește limita superioară a frecvențelor audibile, admisă pentru omul otologic normal, egală cu 16 kHz, ele se numesc unde ultrasonice. O parte din undele ultrasonice, și anume acelea de frecvențe foarte ridicate, nu se mai supun legilor clasice ale mecanicii,

necesiând aplicarea legilor mecanicii cuantice. Pentru a se marca această diferențiere, asemenea unde acustice au luat denumirea de microunde sau hipersunete. Domeniul lor începe de la aproximativ 10^9 Hz și se întinde în medii solide până la 10^{13} — 10^{14} Hz, acestor frecvențe corespunzându-le lungimi de undă comparabile cu distanțele interatomice. 10^{14} Hz este frecvența cea mai ridicată pe care o pot avea undele acustice. Într-un mediu gazos, atenuarea puternică a undelor ultrasonice determină restrângerea domeniului de existență a microundelor.

Undele ultrasonice, întocmai ca toate undele elastice, pot fi de diverse tipuri în raport cu traiectoria pe care o pot avea particulele mediului și cu natura și dimensiunile corpului prin care se propagă. În cazul când traiectoria este liniară și deplasarea particulelor se produce în direcția propagării undelor, undele se numesc longitudinale. Asemenea unde se pot propaga prin orice mediu elastic: gazos, lichid sau solid. Dacă dimensiunile corpului solid nu pot fi considerate infinite și devin comparabile cu lungimea undei acustice se produce o schimbare a volumului corpului prin care se propagă undele, undele se numesc în acest caz cvasilongitudinale. Când traiectoria este tot liniară, însă deplasarea particulelor se face într-o direcție perpendiculară pe direcția propagării undelor, acestea se numesc unde transversale. Asemenea unde se pot propaga numai în medii solide nelimitate sau în lichide foarte vâscoase, adică în medii care dispun de o rigiditate a formei. Dacă corpul solid are dimensiuni finite — o bară sau o placă a căror rază, respectiv grosime, sînt comparabile cu lungimea undei — în loc de unde transversale apar unde de încovoiere.

În cazul când traiectoria este un cerc cu centrul în poziția de repaus a particulei sau o elipsă conținută într-un plan paralel la direcția de propagare a undelor, acestea se numesc unde de suprafață sau unde Rayleigh. Ele se întîlnesc în semispații lichide sau solide la suprafața de separație a unor asemenea medii în contact cu vidul sau cu un mediu suficient de rarefiat, de exemplu, aerul. În cazul adîncimilor sau grosimilor mari, mișcarea particulelor are loc numai în imediata apropiere a suprafeței, în timp ce la o oarecare adîncime particulele mediului rămîn în stare de repaus.

Dacă traiectoria particulei este tot circulară, însă planul circular este perpendicular pe direcția de propagare a undelor, acestea se numesc unde de torsiune. Ele se întîlnesc în cazul barelor circulare sau al tuburilor supuse acțiunii unor cupluri.

Existența undelor de suprafață implică o anumită adîncime a mediului lichid sau o anumită grosime a corpului solid, acestea trebuind să fie mai mari decît lungimea de undă. Sînt cazuri, însă, cînd grosimea unei

plăci este egală sau chiar mai mică decât lungimea de undă. În asemenea situații nu se mai poate vorbi de unde de suprafață pure, ci de o variantă a acestora, cunoscută sub denumirea de unde de placă. Direcția de propagare a undei de placă este paralelă cu suprafața plăcii și întreaga secțiune a plăcii ia parte la mișcarea de vibrație, deci la transportarea energiei. Există diferite tipuri de unde de placă, ce pot fi grupate

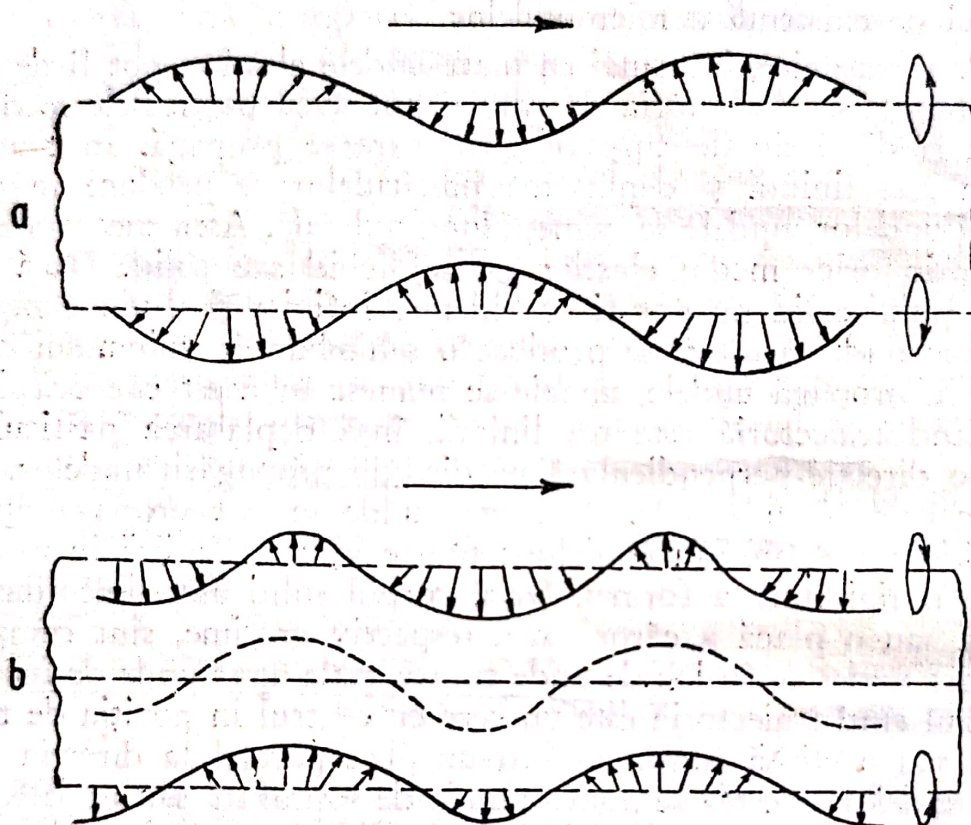


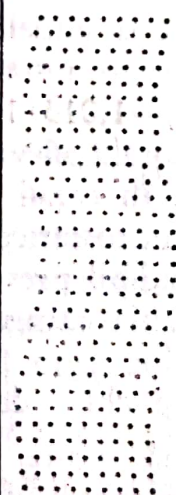
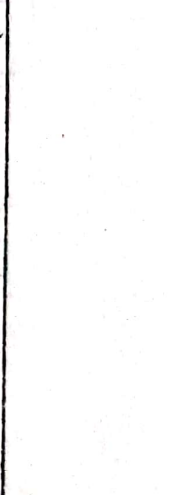
Fig. 1.4. Unde de placă:
a — simetrice; b — asimetrice.

în două categorii: unde simetrice sau de dilatare și unde asimetrice sau de încovoiere (fig. 1.4). În ambele cazuri, placa se comportă ca un ghid de undă.

Fiecare tip de undă menționat mai sus se caracterizează printr-o viteză de propagare, funcție de elasticitatea de volum a mediului și de densitatea acestuia și a cărei expresie este indicată în tabela 1.1.

Regiunea mediului elastic care se găsește în stare de vibrație, fiind sediul unor unde acustice, se numește *cîmp acustic*. În cazul particular al undelor ultrasonice, sediul acestor unde este *cîmpul ultrasonic*.

Tabela 1.1

Tipul de undă	Reprezentare	Mediul	Expresia vitezei	Notații
Unde longitudinale		Gaze	$c_L = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$	p — presiunea gazului ρ — densitatea gazului κ — raportul căldurilor specifice
		Lichide	$c_L = \sqrt{\frac{1}{k\rho}}$	k — compresibilitatea
		Solide	$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{1-\sigma-2\sigma^2}}$	E — Modulul de elasticitate longitudinal σ — coeficientul lui Poisson
		Solide de dimensiuni limitate	$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	
Unde cvasilongitudinale		Solide	$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	G — modulul de elasticitate transversal
Unde transversale		Solide de dimensiuni limitate	$c_T = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$	$B = \omega d \sqrt{\frac{E\rho}{1-\sigma^2}}$ B — rigiditatea la încovoire d — grosimea corpului ω — pulsația
Unde de încovoire		Solide	$c_S = \frac{0.87 + 1.12 \sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx 0.9 \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	
Unde de suprafață		Solide	$c_R = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	
Unde de torsiune		Solide		

Frontul undei poate fi definit ca locul geometric al punctelor în vibrație din mediul prin care se propagă unda, care la un moment dat sînt în fază. Dacă perturbația este produsă de un punct material aflat în vibrație (sursă punctuală) fronturile undei sînt suprafețe sferice, avînd centrul într-un punct care coincide cu sursa. Acestea sînt *undele sferice*. Cînd frontul undei poate fi asimilat cu un plan perpendicular pe direcția de propagare, undele corespunzătoare se numesc *unde plane*. În general, în cazul undelor ultrasonice la o oarecare depărtare de sursa care le-a produs, ele pot fi considerate plane. Acestea sînt undele care își găsesc cea mai largă aplicare în practică, în timp ce undele sferice sînt folosite doar în unele aplicații speciale.

Prin analogie cu raza de lumină, în acustică, dar mai ales în ultra-acustică, domeniu în care lungimile de undă sînt mici, se poate utiliza noțiunea de *rază acustică*, definită ca traseul unui element al frontului undei.

Perturbația provocată de punctul material în vibrație se propagă prin mediul elastic sub formă de compresii și rarefieri. Întrucît compresia se datorește unei mărimi a presiunii și rarefierea unei micșorări a presiunii, propagarea unei unde acustice se traduce printr-o variație a presiunii în timp și spațiu. Considerînd un anumit punct în mediul elastic, *presiunea acustică instantanee* p_i reprezintă presiunea totală la un moment dat, din care se scade presiunea statică în acel punct. Cînd mediul elastic de propagare a undelor este atmosfera, presiunea statică este echivalentă cu presiunea atmosferică p_0 . Pentru condiții normale de presiune și temperatură $p_0 = 1,013 \cdot 10^6 \text{ } \mu\text{b} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Presiunea acustică face ca presiunea totală să varieze deasupra și dedesubtul valorii presiunii atmosferice medii, în cazul propagării undelor în aer sau de o parte și de alta a presiunii hidrostatice în cazul propagării undelor într-un lichid. Dacă în domeniul audibil presiunea acustică corespunzătoare sunelelor celor mai intense deabia atinge o fracțiune din presiunea atmosferică, în cazul ultrasunetelor, prin folosirea sistemelor focalizante, presiunea acustică poate depăși chiar de zeci de ori presiunea atmosferică.

1.2.2. Unde longitudinale plane. Ecuația undelor. Să considerăm că o undă acustică plană se propagă într-un mediu perfect elastic, omogen și izotrop, fără pierderi, după direcția axei. Așa cum s-a arătat, presiunea acustică variază în timp și spațiu, iar ecuația diferențială a undei este

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.17)$$

c reprezentând o constantă care depinde de caracteristicile mediului elastic, numită viteza de fază sau viteză de propagare a undelor longitudinale, sau viteză a sunetului.

Soluția generală a ecuației diferențiale (1.17) poate fi scrisă sub forma

$$p = \psi_1(ct - x) + \psi_2(ct + x) \quad (1.18)$$

în care $\psi_1(ct - x)$ și $\psi_2(ct + x)$ sînt funcții arbitrare, putînd fi funcții sinusoidale, exponențiale, logaritmice etc. Forma specială a acestor funcții, corespunzătoare unei situații fizice date, depinde de modul în care s-a produs perturbația.

Din (1.18) se vede că expresia conține doi termeni. Primul termen $\psi_1(ct - x)$ reprezintă propagarea undei în direcția x -ilor pozitivi, caracterizînd unda progresivă. Cel de-al doilea termen $\psi_2(ct + x)$ reprezintă propagarea undei în direcția x -ilor negativi, caracterizînd unda care se înapoiază spre sursa acustică ce a produs-o. Așadar, soluția generală a ecuației unidimensionale a undei reprezintă simultan două perturbații, care se propagă în același timp cu aceeași viteză, însă în sensuri opuse. Dacă se admite că mediul este extins la infinit, există numai unde progresive, cel de-al doilea termen al ecuației (1.18) anulîndu-se.

Considerînd cazul cel mai important și, în același timp, cel mai uzual al unei perturbații sinusoidale, ecuația (1.18) scrisă sub forma exponențială, devine

$$p = P_1 e^{jk(ct - x)} + P_2 e^{jk(ct + x)} \quad (1.19)$$

Aici P_1 este amplitudinea presiunii corespunzătoare undei plane cu frecvența $f = \omega/2\pi$, propagîndu-se în direcția x -ilor pozitivi cu viteza c ; P_2 amplitudinea presiunii corespunzătoare undei plane cu frecvența tot $f = \omega/2\pi$, propagîndu-se în direcția x -ilor negativi cu viteza c ; $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ numărul de undă, iar λ este lungimea de undă, ce reprezintă distanța în direcția de propagare a undei periodice între două puncte succesive în care frontul undei ajunge în decurs de o perioadă, deci în care perturbația este în aceeași fază. Conform acestei definiții

$$\boxed{\lambda = cT = \frac{c}{f}}, \quad T = \frac{1}{f} \quad (1.20)$$

în care T este perioada mișcării, iar f frecvența.

Folosind relațiile lui Euler se poate trece de la forma exponențială a ecuației undei la forma sa sinusoidală, sub care va fi utilizată în unele cazuri în cursul expunerii. Astfel

$$p = P_1 \sin(\omega t - kx + \varphi_1) + P_2 \sin(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (1.21)$$

unde φ_1 și φ_2 sînt defazajele respective.

Relații analoge cu (1.21) pot fi stabilite luîndu-se în locul presiunii acustice alți parametri ai mișcării, ca viteza particulei sau deplasarea particulei mediului, pusă în vibrație ca urmare a propagării undei. Aceste relații pot fi deduse cu ușurință știind că

$$u = \frac{p}{\rho c} \text{ și } \xi = \int u dt$$

în care u este viteza particulei, iar ξ deplasarea particulei în jurul poziției sale de repaus.

Trebuie observat că ecuația undelor prezentată sub forma (1.17) este valabilă în cazul deplasărilor infinitezimale ale particulei mediului de o parte și de alta a poziției de repaus. Dacă, însă, se ia în considerație vibrația particulei cu amplitudini finite, ecuația de propagare a undei într-un gaz ideal, admitînd ca parametru al mișcării deplasarea particulei ξ , este

$$\left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial x}\right)^{\kappa+1} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2},$$

unde κ reprezintă raportul căldurilor specifice.

Pentru ca această ecuație să fie liniară trebuie ca $(\partial \xi / \partial x)_{\max} \ll 1$. Presupunînd că $(\partial \xi / \partial x)_{\max} \leq 0,01$, pentru ca condiția să fie îndeplinită trebuie ca presiunea acustică să fie mai mică sau cel mult egală cu 1420 N/m^2 , care corespunde la un nivel de presiune acustică de 154 dB peste nivelul de referință, egal cu $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$. În domeniul audibil, sunetele cele mai puternice, produse de dispozitivele cu jet de gaze, deabia ating o astfel de valoare. În cazul propagării undelor acustice prin apă, o condiție asemănătoare conduce la o valoare a presiunii acustice mai mică de 225 atm sau la o intensitate acustică de aproximativ 18000 W/cm^2 . În domeniul ultrasonic posibilitatea concentrării energiei acustice face ca presiunea acustică să depășească valorile limită indicate mai sus și în acest caz trebuie să se ia în considerare vibrația neliniară a particulelor mediului. —

1.3. MĂRIMI ACUSTICE

1.3.1. Impedanța acustică specifică. În studiile legate de propagarea undelor ultrasonice prin diferite medii, pe lângă presiunea acustică și viteza particulei se folosește frecvent o altă mărime, definită ca un raport al acestora.

$$Z_s = \frac{p}{u} \quad (1.22)$$

numită impedanță acustică specifică.

Aceasta este o mărime complexă, deoarece presiunea acustică în general nu este în fază cu viteza particulei. Doar în cazul particular al undelor progresive, care se propagă într-un mediu nelimitat, fără pierderi de energie, presiunea acustică și viteza particulei găsindu-se în fază, impedanța acustică specifică este o mărime reală. În acest caz ea devine egală cu produsul dintre densitatea mediului și viteza de propagare a undei acustice prin acel mediu, adică

$$z_s = \rho c. \quad (1.23)$$

Cum această mărime depinde de caracteristicile fizice ale mediului, produsul ρc se mai numește impedanță caracteristică a mediului. Ea este analogă cu impedanța caracteristică a unei linii electrice de lungime infinită. Se exprimă în kilograme pe metru pătrat și secundă sau în newtoni-secundă pe metru cub, unitate care rezultă din exprimarea masei ca raport dintre forță și accelerație. Unitatea corespunzătoare este denumită uneori și rayl. Valorile impedanțelor caracteristice ale unor gaze și lichide sînt indicate în tabela 1.2.

Pentru unele medii solide, valorile impedanțelor caracteristice sînt indicate în tabela 3.9.

1.3.2. Densitatea de energie acustică. Intensitatea acustică. Sursa acustică transferînd mediului înconjurător o anumită cantitate de energie, aceasta nu rămîne localizată în zona de radiație, ci se propagă din aproape în aproape o dată cu propagarea undei. Dacă se consideră energia din unitatea de volum a mediului elastic se obține densitatea de energie acustică E . Cu alte cuvinte, această mărime este raportul dintre energia acustică și volumul în care ea este conținută.

În cazul undelor plane progresive, densitatea de energie acustică medie este dată de relația

$$E = \frac{p_{ef}^2}{\rho c^2} \quad (1.24)$$

Tabela 1.2

Gazul	Temperatura °C	Densitatea kg/m ³	Viteza m/s	Impedanța kg/m ² .s
Aer	0	1,29	331,6	428,6
Oxigen	0	1,43	316	451,9
Azot	0	1,25	337	421,2
Hidrogen	0	0,089	1 260	112,1
Neon	0	0,90	435	391,5
Argon	0	1,78	319	567,8
Helium	0	0,178	970	172,7
Bioxid de carbon	0	1,97	258	508,3

Lichidul	Temperatura °C	Densitatea 10 ³ kg/m ³	Viteza m/s	Impedanța 10 ⁴ kg/m ² .s
Apă	25	1,000	1 492	1,492
Benzen	20	0,870	1 324	1,152
Alcool	12,5	0,794	1 240	0,985
Glicerină	25	1,260	1 960	2,470
Cloroform	23,5	1,487	1 001	1,490
Acetonă	—	0,790	1 170	0,925
Anilină	24	1,018	1 682	1,712
Tetraclorură de carbon	28	1,596	928	1,483

unde p_{ef} este presiunea medie pătratică sau eficace.

Ca unități de măsură pentru densitatea de energie acustică, în sistemul CGS se ia erg pe centimetru cub, iar în sistemul SI, joule pe metru cub.

În baza legii conservării energiei, energia acustică totală produsă de o sursă trebuie să fie regăsită în mediul elastic în care se propagă unda, mediu în care admitem că nu are loc vreo disipare de energie. Așadar, energia care trece printr-o suprafață dată din mediul de propagare a undelor acustice în unitatea de timp, adică *fluxul de energie acustică*, trebuie să fie egală cu puterea acustică a sursei. Dacă în câmpul acustic considerăm un punct oarecare și luăm raportul dintre fluxul de energie acustică în acel punct și aria suprafeței din jurul lui, normală pe direcția de propagare, se obține *intensitatea acustică* I .

În cazul undelor plane progresive, legea conservării energiei arată că intensitatea acustică trebuie să fie aceeași în toate punctele unde.

$$I = \frac{\phi}{S}$$

Dacă energia acustică trece printr-o suprafață de secțiune unitară, cu viteza c , lungimea coloanei de energie care se scurge în unitatea de timp devine egală cu c , iar energia totală din această coloană este cE , deci

$$I = cE \quad (1.25)$$

sau, ținând seama de relația (1.24), expresia intensității acustice, în cazul undelor plane progresive, devine

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} \quad (1.26)$$

Cunoscând legătura care există între presiunea acustică și viteza particulei, se poate deduce următoarea relație care leagă intensitatea acustică de viteza eficace a particulei

$$I = \rho c u_{ef}^2 \quad (1.27)$$

Unitatea de măsură pentru intensitatea acustică în sistemul CGS este erg pe secundă și centimetru pătrat, iar în sistemul SI, watt pe metru pătrat.

În cazul undelor sferice, care se propagă în toate direcțiile într-un mediu elastic, unde emise de o sursă punctuală de putere P , intensitatea acustică într-un punct aflat la distanța r , de această sursă este

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (1.28)$$

Se vede că intensitatea acustică variază în acest caz invers proporțional cu pătratul distanței. Această scădere a intensității acustice se datorește numai dispersiei energiei în mediul de propagare. Pierderile de energie acustică ce ar avea lor în acest mediu, considerat nedisipativ, prin transformarea energiei acustice într-o altă formă de energie, nu au fost luate în considerație.

În afară de mărimile absolute indicate mai sus, în acustică se mai folosesc mărimi relative, definite ca logaritmul zecimal al raportului a două mărimi absolute (intensități acustice sau presiuni acustice). Astfel, se poate scrie

$$\Delta L = 20 \lg \frac{p_2}{p_1} \text{ și } \Delta L_I = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} \quad (1.29)$$

unde p_1 și p_2 sînt presiunile acustice, iar I_1 și I_2 sînt intensitățile acustice în două puncte oarecare ale mediului 1 și 2, prin care se propagă unda acustică, sau în același punct ale mediului, însă în două momente diferite. Se exprimă în decibeli.

Dacă $p_2 > p_1$, respectiv $I_2 > I_1$, ΔL devine pozitivă și avem o mărire a nivelului, deci o amplificare a energiei acustice. Dacă $p_2 < p_1$, respectiv $I_2 < I_1$, ΔL devine negativă și avem o reducere a nivelului, deci o atenuare a energiei acustice.

1.4. RADIATORI ACUSTICI

1.4.1. Sfera pulsantă. O sursă acustică transferă mediului cu care vine în contact energie mecanică, devenind în felul acesta un radiator acustic. Cel mai simplu radiator acustic este sfera pulsantă, a cărei radiație se produce în mod uniform în toate direcțiile, formîndu-se în jurul sursei un cîmp de unde sferice.

Presiunea acustică într-un punct aflat la distanța r de centrul sferei pulsante, de rază a , este dată de relația

$$p = j\omega \frac{a^2 U_0 \rho}{r} \left(\frac{1 - jka}{1 + k^2 a^2} \right) e^{j[\omega t - k(r-a)]} \quad (1.30)$$

în care U_0 este amplitudinea vitezei superficiale, ρ densitatea mediului, iar $ka = 2\pi a/\lambda$ reprezintă o măsură a raportului dintre dimensiunile liniare ale sursei și lungimea de undă a ultrasunetului emis.

Dacă lungimea de undă a ultrasunetului este mult mai mică decît diametrul sferei pulsante, adică atunci cînd $ka \gg 1$, presiunea acustică devine

$$p \approx \rho c \frac{a U_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.31)$$

relație care arată că presiunea acustică depinde de dimensiunile sursei.

O mărime ce caracterizează un radiator acustic este puterea acustică, definită ca energia acustică totală radiată în unitatea de timp. Dacă sursa acustică este o sferă pulsantă, expresia puterii acustice corespunzătoare este

$$P = 2\pi \rho c a^2 U_0^2 \frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} \quad (1.32)$$

În cazul cînd $ka \ll 1$, deci pentru frecvențe joase, expresia puterii acustice radiate devine

$$P_j = \frac{2\pi\rho\omega^2 a^4 U_0^2}{c}. \quad (1.33)$$

În cazul cînd $ka \gg 1$, deci în domeniul frecvențelor înalte, expresia puterii radiate se simplifică devenind

$$P_i = 2\pi\rho c a^2 U_0^2. \quad (1.34)$$

Datorită faptului că în primul caz puterea acustică radiată este invers proporțională cu viteza de propagare a undelor, iar în cel de-al doilea caz este proporțională cu această viteză, rezultă că o sursă acustică, echivalentă cu o sferă pulsantă, radiază mai bine în domeniul frecvențelor înalte într-un mediu lichid decît într-un gaz, cu atît mai mult cu cît ρ este mai mare la lichide față de gaze.

Ca orice emițător, sfera pulsantă este cuplată cu o anumită sarcină, determinată prin impedanța oferită de mediu suprafeței care radiază, denumită *impedanță de radiație*. Aceasta este o mărime complexă, care în cazul sferei pulsante are expresia

$$Z_r = 4\pi a^2 \rho c \left[\frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} + j \frac{ka}{1 + k^2 a^2} \right] \quad (1.35)$$

a cărei parte reală

$$R_r = 4\pi a^2 \rho c \frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} \quad (1.36)$$

reprezintă rezistența de radiație și a cărei parte imaginară

$$X_r = 4\pi a^2 \rho c \frac{ka}{1 + k^2 a^2} \quad (1.37)$$

reprezintă reactanța de radiație.

În cazul cînd lungimea de undă este mare în comparație cu dimensiunile liniare ale sursei ($ka \ll 1$), rezistența și reactanța de radiație ale sferei pulsante devin

$$R_{rj} = 4\pi a^2 \rho c (ka)^2 \quad \text{și} \quad X_{rj} = 4\pi a^2 \rho c (ka).$$

În cazul cînd lungimea de undă este mică în comparație cu dimensiunile liniare ale sursei ($ka \gg 1$), expresiile rezistenței și reactanței de radiație ale sferei pulsante se simplifică, devenind

$$R_{ri} = 4\pi a^2 \rho c \quad \text{și} \quad X_{ri} = 0.$$

În acest ultim caz, impedanța de radiație acustică se reduce 'aproximativ la o componentă reală, iar sursa întâmpină o sarcină pur rezistivă. Cum $R_{r_i} > R_{r_j}$, rezultă că sfera pulsantă lucrează mai bine în domeniul frecvențelor joase decît în cel al frecvențelor înalte. Astfel poate fi considerat cazul unei surse care radiază unde plane într-un mediu omogen nelimitat.

1.4.2. Pistonul vibrant. În practică, majoritatea surselor de ultrasunete sînt alcătuite dintr-o suprafață plană rigidă de o anumită întindere. Un asemenea radiator acustic la care toate punctele suprafeței plane vibrează în fază se numește *piston vibrant*. Modul în care are loc radiația unui piston vibrant se poate examina considerînd suprafața plană constituită dintr-un foarte mare număr de surse elementare, de raze infinit mici, situate foarte apropiate una de alta. Forma pe care o ia frontul undei în acest caz poate fi dedusă prin aplicarea principiului lui Huygens, admițînd că se produce o interferare a tuturor undelor generate de către sursele elementare considerate.

În cazul unui piston rigid vibrant, avînd secțiunea un cerc de rază a , se poate arăta că presiunea acustică într-un punct al mediului în care radiază pistonul aflat la distanța r de centrul cercului, este dată de expresia

$$p = j\rho c \frac{ka^2 U_0}{2r} e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right], \quad (1.38)$$

în care J_1 este funcția Bessel de ordinul întâi și θ unghiul format de direcția pe care se găsește punctul considerat și axa pistonului.

Din această expresie se vede că sursa acustică are o directivitate, funcția de directivitate fiind definită prin raportul dintre presiunea acustică într-un punct situat la distanța r pe axa pistonului și presiunea acustică corespunzătoare unui alt punct situat la aceeași distanță, însă în afara axei. Expresia acestei funcții este

$$\Phi(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}. \quad (1.39)$$

Funcția de directivitate se anulează pentru $ka \sin \theta = 3,83; 7,02; 10,15; \dots$. Rezultă că primul punct în care presiunea acustică devine egală cu zero, se găsește pe o direcție care face cu axa pistonului unghiul θ_1 dat de relația

$$\theta_1 = \arcsin \frac{3,83}{ka} = \arcsin \left(0,61 \frac{\lambda}{a} \right).$$

În cazul unei unde acustice avînd frecvența de 100 kHz, propagîndu-se în apă ($\lambda = 1,48$ cm), pentru a se obține concentrarea energiei //

într-un con avînd deschiderea $\theta_1 = 10^\circ$, trebuie ca raza suprafeței radiante să fie egală cu 5,2 cm.

Se constată că valoarea unghiului θ este cu atît mai mică cu cît raportul λ/a este mai mic. Cu alte cuvinte, concentrarea de energie acustică în vecinătatea axei centrale a pistonului va fi cu atît mai mare cu cît lungimea de undă a ultrasunetului este mai mică în raport cu dimensiunile radiatorului. Utilizarea ultrasunetelor în locul sunetelor permite în felul acesta să se realizeze o directivitate pronunțată în emisia semnalului, iar acest lucru se obține cu suprafețe de radiație cu mult mai reduse decît cele întrebuițate la radiația sunetelor.

Dar o variație a presiunii acustice, respectiv a intensității acustice, se constată și de-a lungul axei centrale a pistonului. Se poate arăta că această variație este exprimată prin expresia

$$I = I_0 \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{a^2 + r^2} - r) \right] \quad (1.40)$$

unde I_0 este valoarea maximă a intensității.

Pot fi luate în considerare două cazuri extreme:

$$I = 0 \text{ pentru } \sqrt{a^2 + r^2} - r = n\lambda, \text{ de unde } r = \frac{a^2 - n^2 \lambda^2}{2n\lambda} \quad (1.41)$$

$$I = I_0 \text{ pentru } \sqrt{a^2 + r^2} - r = (2n+1) \frac{\lambda}{2}, \text{ de unde } r = \frac{a^2 - (2n+1)^2 \frac{\lambda^2}{4}}{(2n+1)\lambda} \quad (1.42)$$

Modul de variație a intensității acustice în lungul axei în funcție de distanță r , este arătat în fig. 1.5. Se observă un număr de maxime și

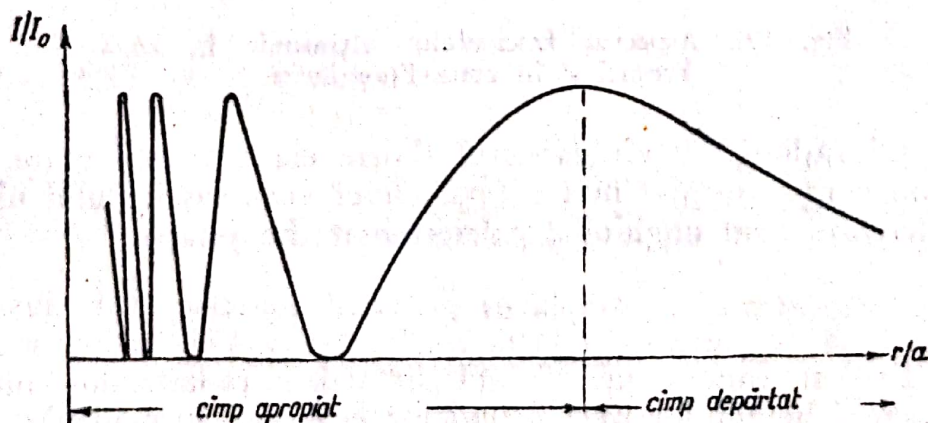


Fig. 1.5. Variația intensității acustice în lungul axei pistonului vibrant.

minime aflate la depărtări față de sursă date de expresiile (1.41) și (1.42). Ultima anulare a intensității se produce pentru cazul $n=0$, la o distanță $r=\infty$, iar penultima anulare are loc pentru $n=1$, la o distanță $r=\frac{a^2-\lambda^2}{2\lambda}$. Ultimul maxim al intensității se produce într-un punct aflat la o depărtare $r=a^2/\lambda$ de suprafața pistonului radiant.

Partea din câmpul acustic cuprinsă între punctul în care are loc ultimul maxim și suprafața pistonului, caracterizată prin prezența unei serii de maxime și minime de presiune, respectiv de intensitate acustică, se numește *zonă Fresnel* sau *câmp apropiat*. Cealaltă parte a câmpului acustic ce se întinde de la punctul unde are loc ultimul maxim al intensității, caracterizată printr-o scădere continuă a intensității acustice, în conformitate cu legea inversului pătratului distanței, se numește *zonă Fraunhofer* sau *câmp depărtat*. În zona Fresnel, fasciculul ultrasonic este paralel, fiind constituit din unde plane, în timp ce în zona Fraunhofer, fasciculul devine divergent, centrul său găsindu-se în centrul sursei (fig. 1.6). În această zonă sînt unde sferice. Distanța pînă la care se consideră câmpul apropiat fiind egală cu a^2/λ , rezultă că întinderea acestui câmp depinde de dimensiunile radiatorului și de lungimea de undă a

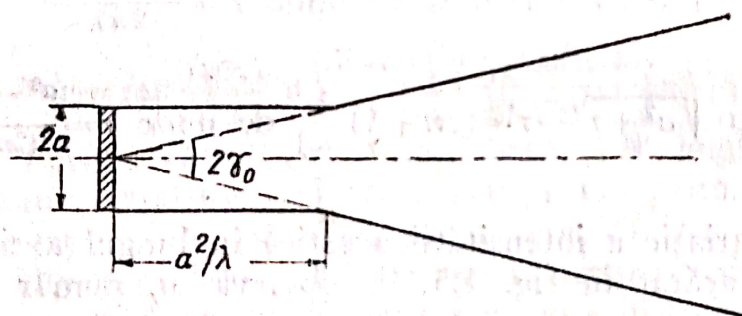


Fig. 1.6. Aspectul fasciculului ultrasonic în zona Fresnel și în zona Fraunhofer.

ultrasunetului radiat. Cu cît raportul dintre ele este mai mare, cu atît se obține un câmp apropiat mai extins. Divergența fasciculului ultrasonic este caracterizată prin unghiul 2γ determinat din relația

$$\gamma_0 = \arctg \frac{\lambda}{a}.$$

Zona Fresnel capătă importanță în cazul radiatorilor ultrasonici datorită tocmai lungimilor mici a undelor generate. Într-adevăr, dacă în cazul unui difuzor avînd diametrul de 20 cm, emițînd în aer un sunet de 1000 Hz, distanța pînă la care se întinde câmpul apropiat nu depă-

șeste 3 cm, în cazul unui radiator de ultrasunete avînd diametrul de 2 cm și emițînd în apă unde ultrasonice de o frecvență egală cu 1 MHz, depărtarea pînă la care se poate considera cîmpul apropiat este de aproximativ 28 cm.

Existența celor două zone prezintă numeroase aplicații practice. Astfel, la măsurarea coeficientului de absorbție al unui gaz sau al unui lichid cu ajutorul interferometrului pot interveni erori experimentale cauzate de divergența fasciculului ultrasonic. Din acest motiv este indicat să se limiteze domeniul de lucru la zona Fresnel. O altă situație intervine în cazul defectoscopiei ultrasonice. Datorită existenței în zona cîmpului apropiat a unor puncte în care intensitatea acustică se anulează, detectarea unor defecte de dimensiuni reduse, ale căror poziții ar coincide cu acelea în care valoarea intensității devine minimă s-ar face cu greutate, prezența unor asemenea defecte putînd trece neobservată.

Puterea acustică corespunzătoare unui piston vibrant se poate calcula cu expresia

$$P = \frac{1}{2} \rho c \pi a^2 U_0^2 R(2ka), \quad (1.43)$$

unde $R(2ka)$ reprezintă o funcție indicată în diagrama din fig. 1.7.

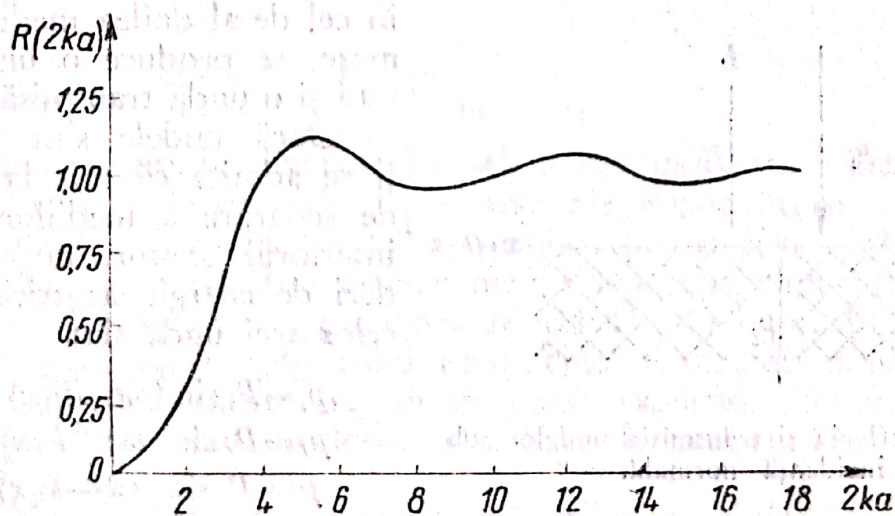


Fig. 1.7. Variația funcției $R(2ka)$.

În cazul cînd pistonul lucrează în domeniul ultrasunetelor, deci a frecvențelor înalte, $R(2ka) \approx 1$ și relația (1.43) devine

$$P \approx \frac{1}{2} \rho c S U_0^2 \quad (1.44)$$

unde S este aria suprafeței pistonului rigid.

Se constată că puterea acustică radiată de un piston rigid este proporțională cu aria suprafeței acestuia și cu pătratul amplitudinii vitezei cu care vibrează toate punctele pistonului. În plus, puterea acustică a unui piston vibrant depinde și de impedanța caracteristică a mediului în care are loc radiația energiei acustice. Avînd în vedere că impedanța caracteristică a apei este mai mare decît cea a aerului, rezultă că puterea acustică a unei aceleiași piston rigid este mai mare atunci cînd acesta lucrează în apă decît atunci cînd emisia se face în aer.

1.5. REFLEXIA ȘI REFRACTIA UNDELOR PLANE

1.5.1. Reflexia și transmisia undelor sub incidență normală. Considerăm cazul unui fascicul de unde longitudinale plane, care se propagă după o direcție normală la suprafața de separare a două medii extinse la infinit și caracterizate prin impedanțele caracteristice $\rho_1 c_1$, respectiv $\rho_2 c_2$. Ajungînd la suprafața de separare a mediilor, unda acustică suferă o reflexie (o parte din energia acustică incidentă fiind redată primului mediu) și o transmisie (o parte din energia acustică incidentă pătrunzînd

în cel de-al doilea mediu). Ca urmare, se produce o undă reflectată și o undă transmisă (fig. 1.8).

Dacă undele sînt sinusoidale și se admite că atît la suprafața de separare a mediilor cît și în interiorul acestora nu există pierderi de energie acustică, ecuațiile celor trei unde sînt

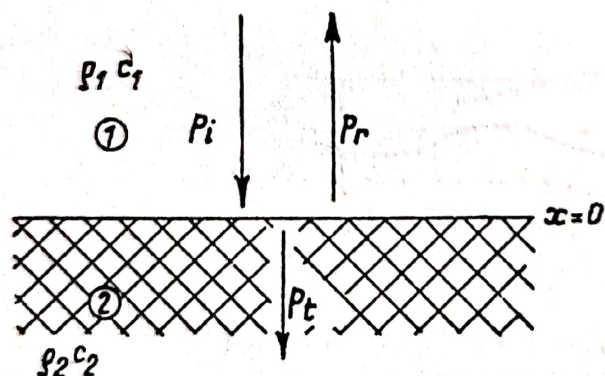


Fig. 1.8. Reflexia și transmisia undelor sub incidență normală.

$$\begin{aligned} p_i &= P_i \sin(\omega t - k_1 x) \\ p_r &= P_r \sin(\omega t + k_1 x) \\ p_t &= P_t \sin(\omega t - k_2 x) \end{aligned} \quad (1.45)$$

unde k_1 și k_2 reprezintă numărul de undă pentru primul mediu, respectiv pentru al doilea mediu ($k = 2\pi/\lambda$).

Relații analoge se pot obține și pentru vitezele particulelor. Pentru a calcula amplitudinea presiunii reflectate și cea a presiunii transmise, cunoscînd amplitudinea presiunii incidente pe suprafața de separare a mediilor, precum și impedanțele caracteristice ale celor două medii în contact, este necesar să se scrie două relații de condiție, satisfăcute în

orice moment. Aceste relații de condiții sînt bazate pe legea continuității presiunii și vitezei.

Presiunea acustică pe ambele fețe ale suprafeței de separare trebuind să fie aceeași, rezultă

$$p_i + p_r = p_t. \quad (1.46)$$

Vitezele particulelor, normale la suprafața de separare, trebuind să fie de asemenea egale, în ipoteza că pe tot timpul propagării undei cele două medii rămîn permanent în contact, rezultă

$$u_i - u_r = u_t. \quad (1.47)$$

Știind că $p_i = u_i \rho_1 c_1$; $p_r = u_r \rho_1 c_1$ și $p_t = u_t \rho_2 c_2$, pentru condiția la limită $x=0$, în urma simplificării se obține

$$P_i + P_r = P_t$$

$$\rho_2 c_2 (P_i - P_r) = \rho_1 c_1 P_t$$

de unde

$$P_r = P_t \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (1.48)$$

și

$$P_t = P_i \frac{2 \rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (1.49)$$

Raportul dintre presiunea reflectată și cea incidentă poate fi pozitiv sau negativ, funcție de valorile relative ale impedanțelor caracteristice ale celor două medii. Dacă $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$, adică atunci cînd unda trece dintr-un mediu mai puțin dens într-un mediu mai dens, raportul presiunilor este pozitiv și, ca urmare, presiunea reflectată este în fază cu presiunea incidentă. Dacă $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$, adică atunci cînd unda trece dintr-un mediu mai dens într-un mediu mai puțin dens, raportul presiunilor devine negativ, cu alte cuvinte are loc o schimbare de fază cu 180° pentru presiunea acustică.

Luînd în considerare rapoartele presiunilor, se obțin:

— factorul de reflexie acustică R definit de

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}; \quad (1.50)$$

— factorul de transmisie acustică T definit de

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2 \rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}. \quad (1.51)$$

Dacă în loc de rapoartele presiunilor se iau rapoartele intensităților acustice corespunzătoare undelor incidentă, reflectată și transmisă se obțin:

— coeficientul de reflexie acustică ρ definit de

$$\rho = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2; \quad (1.52)$$

— coeficientul de transmisie acustică τ definit de

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2}. \quad (1.53)$$

Între cei doi coeficienți există relația

$$\tau = 1 - \rho.$$

În cazul cînd cele două medii în contact au impedanțe egale, factorul de reflexie, ca și coeficientul de reflexie acustică, devine egal cu zero, iar factorul de transmisie, respectiv coeficientul de transmisie acustică, atinge valoarea 1, cu alte cuvinte nu se produce nici o reflexie a unde, întreaga energie acustică trecînd din primul mediu în cel de-al doilea mediu. Valoarea factorului de reflexie, va fi cu atît mai mare și ca urmare valoarea factorului de transmisie mai mică, cu cît raportul impedanțelor caracteristice ale mediilor în contact este mai diferit de 1. Considerînd diferite medii în contact, valorile coeficienților de reflexie și de transmisie acustică sînt indicate în tabela 1.3.

Tabela 1.3

Natura mediilor în contact	ρ	τ
Aer și apă	0,99991	0,0001
Apă și oțel	0,875	0,125
Cauciuc și apă	0,001	0,999
Plexiglas și oțel	0,755	0,245
Cuarț și aer	0,9998	0,0002
Cuarț și apă	0,660	0,340
Cuarț și plexiglas	0,401	0,599

Dacă se ia în considerare propagarea unei unde longitudinale plane sub incidență normală prin trei medii în contact, avînd impedanțele caracteristice respective $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$ și $\rho_3 c_3$, coeficientul de reflexie acustică și coeficientul de transmisie acustică, definiți ca raportul dintre intensi-

tatea acustică reflectată în primul mediu și cea incidentă, respectiv ca raportul dintre intensitatea acustică a undei transmisă în al treilea mediu și cea incidentă, sînt dați de relațiile

$$\rho = \frac{(\rho_3 c_3 - \rho_1 c_1)^2 \cos^2 k_2 l + \left(\rho_2 c_2 - \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} \right)^2 \sin^2 k_2 l}{(\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1)^2 \cos^2 k_2 l + \left(\rho_2 c_2 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} \right)^2 \sin^2 k_2 l} \quad (1.54)$$

și

$$\tau = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{(\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1)^2 \cos^2 k_2 l + \left(\rho_2 c_2 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} \right)^2 \sin^2 k_2 l} \quad (1.55)$$

l fiind grosimea stratului intermediar, care este constituit din mediul al doilea.

Din ultima expresie se constată că coeficientul de transmisie acustică depinde de mărimea impedanțelor caracteristice ale celor trei medii în contact, precum și de grosimea stratului intermediar. Pot fi luate în considerare trei cazuri particulare:

a) Stratul intermediar este foarte subțire ($k_2 l \ll 1$). Ca urmare, relația (1.55) se reduce la relația (1.53). Se vede că stratul intermediar nu intervine cu nimic în transmisia undelor acustice. Trebuie menționat că valoarea lui l , pentru care ne putem situa în cazul arătat, depinde de valorile relative ale impedanțelor caracteristice. Într-adevăr, dacă $\rho_2 c_2$ este foarte mic în comparație cu mărimile impedanțelor stratelor adiacente, această aproximație nu mai este justificată, deoarece nu mai este posibil să se neglijeze al doilea termen de la numărătorul relațiilor (1.54), (1.55).

b) Grosimea stratului intermediar este un număr întreg de jumătăți de lungime de undă ($l = n\lambda/2$, sau $k_2 l = n\pi$). În acest caz, relația (1.55) se reduce la

$$\tau = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{(\rho_1 c_1 + \rho_3 c_3)^2} \quad (1.56)$$

Deci, și în acest caz stratul intermediar nu intervine la propagarea undei acustice. Dacă primul și cel de-al treilea strat au o aceeași impedanță caracteristică, coeficientul de transmisie devine egal cu unitatea, cu alte cuvinte întreaga energie acustică se transmite din primul mediu în cel de-al treilea mediu.

c) Grosimea stratului intermediar este un număr impar de sferturi de lungimi de undă ($l = (2n+1)\lambda/4$, sau $k_2 l = (2n+1)\frac{\pi}{2}$). În acest caz, relația (1.55) se reduce la

$$\tau = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1 \rho_3 c_3 / \rho_2 c_2)^2} \quad (1.57)$$

Coeficientul de transmisie poate deveni egal cu 1, deci se poate obține o transmisie integrală a energiei acustice din primul mediu în cel de-al treilea mediu în cazul când $\rho_2 c_2 = \sqrt{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}$.

Dimpotrivă, dacă impedanța caracteristică a stratului intermediar este neglijabilă în comparație cu valorile impedanțelor caracteristice ale celorlalte două medii, de exemplu atunci când stratul intermediar este aer, coeficientul de transmisie tinde către zero.

Expresiile (1.54) și (1.55) au fost stabilite în ipoteza că suprafețele de separare ale celor trei medii în contact sînt perfect plane. Acest lucru poate fi admis atîta timp cît neregularitățile suprafețelor nu sînt mai mari ca $1/20\lambda$, unde λ este lungimea de undă a ultrasunetului care străbate cele trei medii.

1.5.2. Reflexia și refracția undelor sub incidență oblică. Atunci când o undă plană longitudinală (LO) întâlnește planul de separare a două

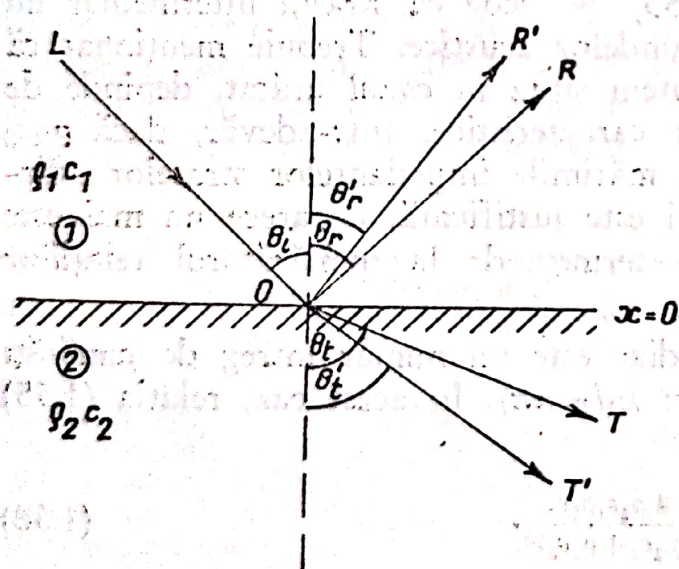


Fig. 1.9. Reflexia și refracția undelor sub incidență oblică.

medii în contact sub un unghi de incidență θ_i , o parte din energia acustică este reflectată, direcția unei longitudinale reflectate (OR) făcînd cu normala la planul de separare unghiul θ_r și o altă parte din energia acustică, este transmisă în cel de-al doilea mediu, direcția unei longitudinale transmise (OT) făcînd cu normala unghiul θ_t (fig. 1.9).

Datorită faptului că presiunea acustică corespunzătoare unei incidente este dirijată oblic în raport cu suprafața de separare a celor două medii în contact, ea poate fi descompusă în două componente: una normală, acționînd perpendicular pe plan și alta tangențială, acționînd de-a lungul planului de separare. Straturile

mediului la suprafața de separare fiind supuse, prin urmare, atât la o presiune care exercită un efort de compresiune cât și la o presiune care exercită un efort tangențial, iau naștere în ambele medii unde longitudinale și unde transversale. Acestea din urmă se vor reflecta în primul mediu după direcția (OR') formînd cu normala unghiului θ_r' și se vor transmite în cel de-al doilea mediu după direcția (OT'), formînd cu normala unghiul θ_t' .

Direcțiile diferitelor unde pot fi determinate aplicîndu-se în acest caz legea lui Snell

$$\theta_r = \theta_t \text{ și } \frac{c_1}{\sin \theta_t} = \frac{c_1'}{\sin \theta_r'} = \frac{c_2}{\sin \theta_t} = \frac{c_2'}{\sin \theta_t'} \quad (1.58)$$

în care c_1 și c_2 sînt vitezele undelor longitudinale în cele două medii, iar c_1' și c_2' sînt vitezele undelor transversale în cele două medii.

În cazul în care primul mediu este un gaz sau un lichid și mediul al doilea este un solid, nu există undă transversală reflectată (OR'), deoarece în gaze și lichide, cu excepția celor foarte vîscoase, componenta tangențială a presiunii acustice devine egală cu zero. De asemenea, dacă al doilea mediu este un gaz sau un lichid, nu va exista undă transversală transmisă (OT').

Considerînd că cele două medii în contact sînt solide este important a examina două cazuri limită.

Cazul I. Unghiul de incidență θ_i are o astfel de valoare încît unghiul de refracție corespunzător undei longitudinale este egal cu 90° , deci $\theta_t = 90^\circ$. Din relațiile (1.58), luînd în considerare primul și al treilea raport, rezultă

$$\frac{c_1}{\sin \theta_{i1}} = \frac{c_2}{\sin 90^\circ}, \text{ de unde } \theta_{i1} = \arcsin \frac{c_1}{c_2}. \quad (1.59)$$

În acest caz unda longitudinală este reflectată total, ea fiind dirijată de-a lungul planului de separare a mediilor. Pentru unghiuri de incidență mai mari decît prima valoare limită, dată de relația (1.59), în cel de-al doilea mediu nu mai sînt transmise unde longitudinale, existînd doar unde transversale.

Cazul II. Unghiul de incidență θ_i are o astfel de valoare încît unghiul de refracție corespunzător undei transversale devine egal cu 90° ,

deci $\theta'_i = 90^\circ$. Din relațiile (1.58), luând în considerare primul și ultimul raport, rezultă

$$\frac{c_1}{\sin \theta_{i2}} = \frac{c'_2}{\sin 90^\circ}, \text{ de unde } \theta_{i2} = \arcsin \frac{c_1}{c_2}. \quad (1.60)$$

În acest caz, unda transversală este reflectată total, ea fiind conținută în planul de separare a celor două medii. Pentru această a doua valoare limită a unghiului de incidență, nu există în al doilea mediu decât unde de suprafață. Cele arătate mai sus sînt valabile numai cînd $c_1 < c'_2$.

Considerînd cazul propagării undei transversale din plexiglas în oțel, cele două valori limită ale unghiului de incidență sînt:

— pentru unde longitudinale

$$\theta_{i1} = \arcsin \frac{c_1}{c_2} = \arcsin \frac{2730}{5900}, \text{ de unde } \theta_{i1} = 27^\circ 35';$$

— pentru unde transversale

$$\theta_{i2} = \arcsin \frac{c_1}{c'_2} = \arcsin \frac{2730}{3230}, \text{ de unde } \theta_{i2} = 57^\circ 40'.$$

Cunoașterea acestor valori limită ale unghiului de incidență este utilă la construirea transformatorilor de undă în vederea transmiterii unui anumit tip de undă într-un corp solid, în scopul în special al detectării defectelor interioare. Cele arătate mai sus pot fi concretizate pentru cazul transmiterii undelor acustice din plexiglas în oțel în tabela 1.4.

Tabela 1.4

Unghiul de incidență	Tipul de undă în metal
0°	Unde longitudinale
$0^\circ - 27^\circ 35'$	Unde longit. + unde transversale
$27^\circ 35' - 57^\circ 40'$	Unde transversale
$> 57^\circ 40'$	Unde de suprafață

Dacă undele longitudinale ajung la suprafața de separare a mediilor sub incidență oblică, coeficienții de reflexie și de transmisie acustică pot fi obținuți din expresiile

$$\rho = \left(\frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_t - \rho_1 c_1 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_t + \rho_1 c_1 \cos \theta_i} \right)^2 \quad (1.61)$$

și

$$\tau = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2 \cos \theta_t \cos \theta_i}{(\rho_2 c_2 \cos \theta_t + \rho_1 c_1 \cos \theta_i)^2}. \quad (1.62)$$

În cazul particular al undelor longitudinale sub incidență normală $\theta_i = 0$ și $\theta_t = 0$, iar expresiile (1.61) și (1.62) se simplifică devenind identice cu expresiile (1.52) și (1.53). În această situație, componenta tangențială a presiunii acustice fiind egală cu zero nu se produce nici o conversiune a tipului de undă.

Un caz frecvent întâlnit în practică, la cuplajul dintre un transductor electroacustic și mediul în care este radiată energia acustică, este acela al propagării prin trei medii de impedanțe caracteristice diferite ($\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$ și $\rho_3 c_3$) a unei unde plane longitudinale, care atinge prima suprafață de separare a mediilor sub un unghi de incidență oarecare. Presupunem că mediul intermediar de grosime l , este un lichid sau un gaz, deci un mediu în care nu se propagă unde transversale (fig. 1.10). În acest caz coeficientul de reflexie acustică și coeficientul de transmisie acustică corespunzători undelor longitudinale, definiți ca mai sus, sînt dați de relațiile

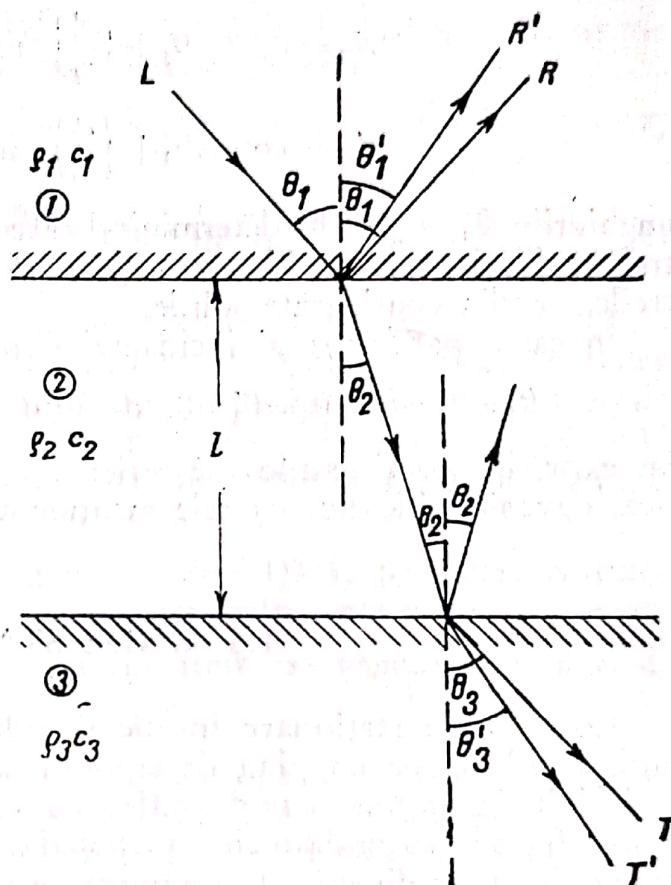


Fig. 1.10. Propagarea undelor acustice prin trei medii.

$$\rho = \frac{(\rho_1 c_1 A'_1 \cos \theta_3 + \rho_3 c_3 A_3 \cos \theta_1)^2 \cos \theta_2 \cos^2 (k_2 l \cos \theta_2) + A}{(\rho_1 c_1 A_1 \cos \theta_3 + \rho_3 c_3 A_3 \cos \theta_1)^2 \cos^2 \theta_2 \cos^2 (k_2 l \cos \theta_2) + B} \quad (1.63)$$

$$\text{unde } A = (\rho_2 c_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} A'_1 A_3 \cos^2 \theta_2)^2 \sin^2 (k_2 l \cos \theta_2)$$

$$B = (\rho_2 c_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} A_1 A_3 \cos^2 \theta_2)^2 \sin^2 (k_2 l \cos \theta_2)$$

și

$$\tau = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_3 c_3 \cos^2 \theta_1 \cos^2 2 \theta'_1 \cos^2 \theta_2 \cos^2 2 \theta'_3}{(\rho_1 c_1 A_1 \cos \theta_3 + \rho_3 c_3 A_3 \cos \theta_1)^2 \cos^2 \theta_2 \cos^2 (k_2 l \cos \theta_2) + C} \quad (1.64)$$

$$\text{unde } C = (\rho_2 c_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} A_1 A_3 \cos^2 \theta_2)^2 \sin^2 (k_2 l \cos \theta_2)$$

în care

$$A_1 = \cos^2 2\theta'_1 + \left(\frac{c'_1}{c_1}\right)^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta'_1$$

$$A_1 = \cos^2 2\theta_1 + \left(\frac{c'_1}{c_1}\right)^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta'_1$$

$$A_3 = \cos^2 2\theta'_3 + \left(\frac{c'_3}{c_3}\right)^2 \sin 2\theta_3 \sin 2\theta'_3$$

unghiurile θ_1 , θ_2 și θ_3 determinînd direcțiile undelor longitudinale în cele trei medii, iar θ'_1 și θ'_3 direcțiile undelor transversale în primul și al treilea mediu considerate solide.

În cazul particular al incidenței normale

$$\theta_1 = \theta'_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta'_3 = 0, \text{ de unde } A_1 = A_3 = 1 \text{ și } A'_1 = -1$$

iar expresiile coeficienților de reflexie și de transmisie acustică se simplifică, devenind identice cu cele menționate la (1.54) și (1.55).

1.6. UNDE STAȚIONARE

1.6.1. Unde staționare în medii nelimitate. În urma reflexiei unei unde incidente pe un plan de separare a două medii în contact, extinse la infinit, ia naștere o undă reflectată care se propagă în primul mediu și interferează cu unda incidentă. Așadar, în orice punct din acest mediu, punct situat pe direcția de propagare a undelor, vor trece la un moment dat două unde: una incidentă și alta reflectată. Ca urmare, presiunea acustică într-un punct aflat la distanța x de planul de separare a mediilor în contact, va fi egală cu suma presiunilor celor două unde specificate mai sus, adică

$$p = P_i \sin(\omega t - k_1 x) + P_r \sin(\omega t + k_1 x) \quad (1.65)$$

unde P_i și P_r sînt amplitudinile celor două presiuni.

În mod analog se poate scrie ecuația vitezei particulei în același punct și anume

$$u = \frac{P_i}{\rho_1 c_1} \sin(\omega t - k_1 x) - \frac{P_r}{\rho_1 c_1} \sin(\omega t + k_1 x). \quad (1.66)$$

În cele de mai sus s-a considerat că primul mediu nu este absorbant, deci nu există disipare de energie acustică.

Pot fi deosebite două cazuri care prezintă interes în domeniul ultra-acusticii.

Cazul I. $\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2$, adică unda care se propagă într-un mediu mai puțin dens este reflectată de un mediu mai dens. Presupunând că întreaga energie acoustică se reflectă, deci $P_i = P_r = P$, expresiile (1.65) și (1.66) ale presiunii acustice, respectiv ale vitezei particulei, devin

$$p = 2P \sin \omega t \cos k_1 x \quad (1.67)$$

și

$$u = -\frac{2P}{\rho_1 c_1} \cos \omega t \sin k_1 x. \quad (1.68)$$

Din cele două relații se vede că în dreptul suprafeței de separare a mediilor ($x=0$), sau în puncte aflate la distanțe egale cu $n\lambda/2$, presiunea acoustică devine maximă și egală cu $P_{\max} = 2P \sin \omega t$, în timp ce valorile vitezei particulei trec printr-un minim egal, în cazul considerat, cu zero. Punctele menționate se numesc antinoduri sau ventre de presiune și noduri de viteză.

În puncte aflate la distanțe egale cu $(2n+1)\lambda/4$, presiunea acoustică devine minimă și egală cu zero, iar viteza particulei trece printr-un maxim egal cu $\frac{2P}{\rho_1 c_1} \cos \omega t$. Punctele considerate în acest caz se numesc noduri de presiune și antinoduri sau ventre de viteză.

Cazul II. $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$, adică unda care se propagă dintr-un mediu mai dens, de exemplu lichid sau solid, este reflectată într-un mediu mai puțin dens, de exemplu un gaz. S-a văzut că într-un asemenea caz, după reflexie intervine o schimbare de fază cu 180° pentru presiunea acoustică și nici o schimbare de fază pentru viteza particulei. Presupunând ca mai sus că întreaga energie acoustică se reflectă, expresiile (1.65) și (1.66) devin

$$p = -2P \cos \omega t \sin k_1 x, \quad (1.69)$$

și

$$u = \frac{2P}{\rho_1 c_1} \sin \omega t \cos k_1 x. \quad (1.70)$$

Din cele două relații se constată că în dreptul suprafeței de separare a mediilor ($x=0$), sau în punctele aflate la distanțe egale cu $n\lambda/2$, presiunea acoustică devine minimă și egală în cazul considerat cu zero. Valorile vitezei trec printr-un maxim egal cu $\frac{2P}{\rho_1 c_1} \sin \omega t$. Valorile presiunii

devin maxime și egale cu $2P \cos \omega t$ în punctele depărtate de suprafața de reflexie cu $(2n+1)\lambda/4$. În aceste puncte valorile vitezei sînt egale cu zero.

Așadar, prin interferarea unei unde incidente cu o undă reflectată ia naștere un sistem de unde staționare, caracterizat printr-o serie de noduri și antinoduri de presiune, respectiv de viteză a particulei. Poziția punctelor nodale și antinodale depinde de frecvența ultrasunetelor, însă nu depinde de timp.

1.6.2. Unde staționare în medii limitate. În unele situații, ca de exemplu în bare sau în coloane de gaz sau de lichid, mediul în care se propagă unda acustică nu poate fi considerat extins la infinit. Există în asemenea cazuri două plane de reflecție care limitează mediul de propagare a undei, plane normale pe direcția de propagare, distanța dintre ele fiind finită și egală cu l . Pentru generalizarea problemei admitem că există disipare de energie în mediu, constanta de atenuare fiind α , iar coeficienții de reflexie ai celor două plane care limitează mediul sînt respectiv ρ_E și ρ_R (fig. 1.11). Expresia presiunii acustice corespunzătoare unui punct M , situat la o distanță x de planul de reflexie E , scrisă sub formă exponențială este

$$p = P e^{j\omega t} e^{-(\alpha + jk)x}. \quad (1.71)$$

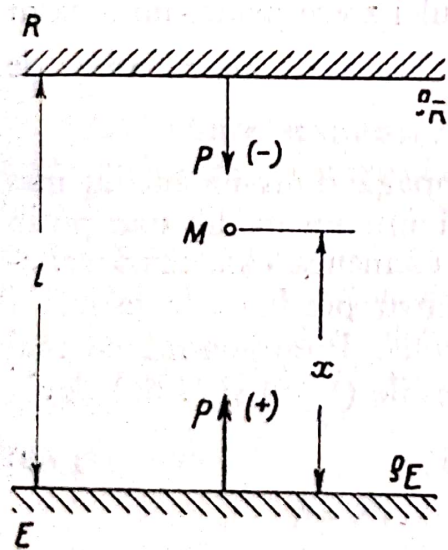


Fig. 1.11. Formarea undelor staționare în medii limitate.

După ce s-a reflectat o dată pe planul R și o dată pe planul E , unda care vine dinspre acest plan, ajunge în punctul M după ce a parcurs distanța $2l+x$. Pe de altă parte, unda care vine dinspre planul R ajunge în același punct după ce a parcurs distanța $2l-x$, apoi ajunge din nou din aceeași direcție după ce s-a reflectat de cele două plane, adică după ce a fost parcursă distanța $4l-x$ etc.

Expresia presiunii acustice corespunzătoare undei care ajunge în punctul M venind dinspre planul E , după efectuarea a n reflexii pe ambele suprafețe delimitatoare este

$$p_+ = P e^{j\omega t} \rho_E^n \rho_R^n e^{-(\alpha + jk)(2nl+x)}. \quad (1.72)$$

Expresia presiunii acustice corespunzătoare unde care ajunge în acest punct M venind însă dinspre planul R , deci din sens contrar primei unde, după efectuarea a n reflexii de planul R și a $n-1$ reflexii de planul E este

$$p_- = P e^{j\omega t} \rho_R^n \rho_E^{n-1} e^{-(\alpha+jk)(2nl-x)}. \quad (1.73)$$

Presiunea acustică rezultantă ca urmare a celor n reflexii va fi

$$p = P e^{j\omega t} \left[e^{-(\alpha+jk)x} + \rho_R \rho_E e^{-(\alpha+jk)(2l+x)} + \rho_R^2 \rho_E^2 e^{-(\alpha+jk)(4l+x)} + \dots \right. \\ \left. + \rho_R e^{-(\alpha+jk)(2l-x)} + \rho_R^2 \rho_E e^{-(\alpha+jk)(4l-x)} + \dots \right]. \quad (1.74)$$

Efectuând însumările, expresia (1.74) se mai poate scrie

$$p = P e^{j\omega t} \frac{e^{-(\alpha+jk)x} + \rho_R e^{-(\alpha+jk)(2l-x)}}{1 - \rho_R \rho_E e^{-(\alpha+jk)2l}}. \quad (1.75)$$

La limită pentru $x=0$, deci în planul E , presiunea acustică devine

$$p_{0E} = P e^{j\omega t} \frac{1 + \rho_R e^{-(\alpha+jk)2l}}{1 - \rho_R \rho_E e^{-(\alpha+jk)2l}} \quad (1.76)$$

iar pentru $x=l$, deci în planul de reflexie R , presiunea acustică devine

$$p_{0R} = P e^{j\omega t} \frac{(1 + \rho_R) e^{-(\alpha+jk)2l}}{1 - \rho_R \rho_E e^{-(\alpha+jk)2l}}. \quad (1.77)$$

Relațiile (1.76) și (1.77) stau la baza teoriei interferometrului ultrasonic, la care în coloana de fluid cuprinsă între placa de cuarț emițătoare E și placa reflectoare R se formează un sistem de unde staționare. Considerînd că mediul este un gaz, în care situație în mod practic întreaga energie acustică se reflectă de suprafețele delimitatoare ale coloanei, deci $\rho_R = \rho_E = 1$, expresia (1.75) se reduce la

$$p = P e^{j\omega t} \frac{\operatorname{ch}(\alpha+jk)(l-x)}{\operatorname{sh}(\alpha+jk)l} \quad (1.78)$$

iar presiunea acustică în planul E devine în acest caz

$$P_{0E} = P e^{j\omega t} \coth(\alpha+jk)l, \quad (1.79)$$

care se mai poate scrie și sub forma

$$P_{0E} = P e^{j\omega t} \frac{\operatorname{sh} 2\alpha l - j \sin 2kl}{\operatorname{ch} 2\alpha l - \cos 2kl}. \quad (1.79')$$

Se constată că expresia presiunii acustice este o cantitate complexă de forma

$$P_{0E} = P(A + jB)e^{j\omega t} \quad (1.80)$$

în care

$$A = \frac{\operatorname{sh} 2\alpha l}{\operatorname{ch} 2\alpha l - \cos 2kl} \quad (1.81)$$

și

$$B = \frac{\sin 2kl}{\operatorname{ch} 2\alpha l - \cos 2kl} \quad (1.82)$$

În fig. 1.12 și 1.13 sînt reprezentate grafic funcțiile A și B . Din examinarea diagramelor se constată că termenul real devine maxim și egal cu

$$A_{\max} = \operatorname{coth} \alpha l \quad (1.83)$$

ori de cîteori distanța dintre cele două suprafețe reflectante este egală cu un număr întreg de jumătăți de lungimi de undă ($l = n\lambda/2$). Pentru aceste valori ale distanței, termenul imaginar trece prin zero, această trecere marcînd și o schimbare de semn.

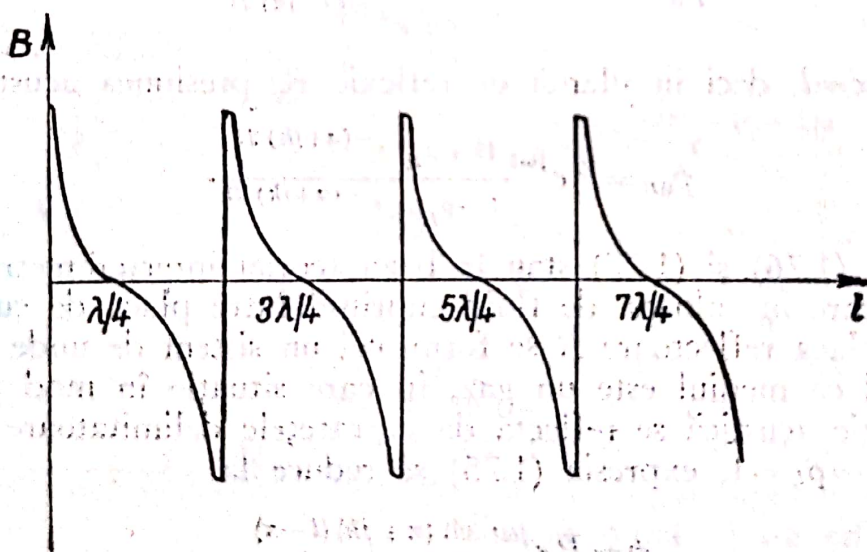


Fig. 1.12. Variația cu distanța a funcției $A = \frac{\operatorname{sh}(2\alpha l)}{\operatorname{ch}(2\alpha l) - \cos(2kl)}$

În cazul cînd distanța dintre suprafețele reflectate devine egală cu un număr impar de sferturi de lungime de undă [$l = (2n+1)\lambda/4$] valoarea termenului real devine minimă și egală cu

$$A_{\min} = \operatorname{tgh} \alpha l \quad (1.84)$$

Pentru valori ale acestei distanțe foarte apropiate de cele de mai sus termenul imaginar atinge valoarea maximă.

Existența undelor staționare în multe situații este considerată de nedorit, cum ar fi la unele măsurători acustice. În alte situații, însă, se caută

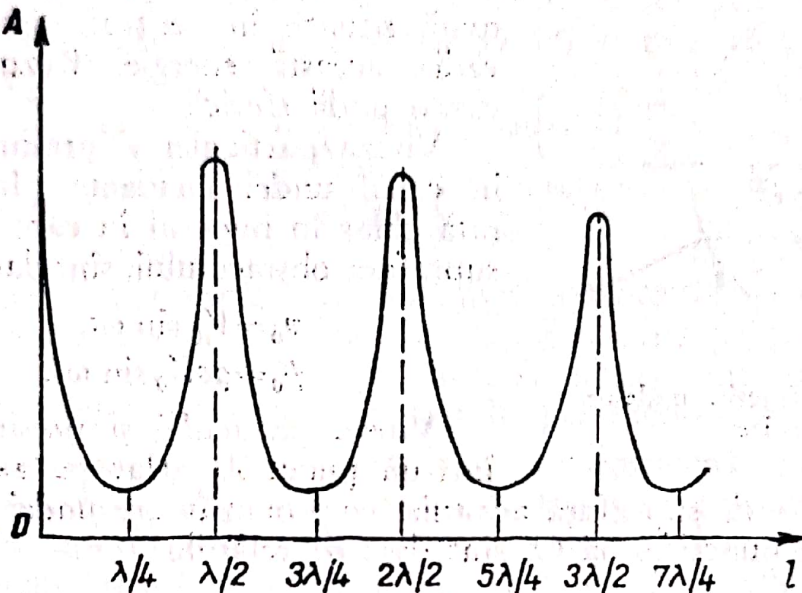


Fig. 1.13. Variația cu distanța a funcției $B = \frac{\sin(2kl)}{\operatorname{ch}(2\alpha l) - \cos(2kl)}$

a se produce în mod voit unde staționare, ca de exemplu în măsurătorile interferometrice sau în operația de aglomerare și depunere a particulelor aflate în suspensie într-un gaz sau într-un lichid.

1.7. DIFRACTIA ȘI DIFUZIA UNDELOR ACUSTICE

Prezența unui obstacol într-un câmp acustic produce o perturbare în propagarea undei, în sensul că o parte din energia incidentă este difuzată de către suprafața obstacolului. Undele astfel produse interferează cu undele incidente și reflectă o parte din energia incidentă, în timp ce o altă parte din energia acustică incidentă este transportată mai departe de unde, prin ocolirea obstacolului de către acestea. Acesta din urmă este fenomenul de difracție acustică. Atât difracția cât și difuzia depind de mărimea și forma corpului interpus în calea undelor ultrasonice.

Studiul difracției nu poate fi făcut decât în cazul unor obstacole de formă simplă: un disc, o sferă sau un cub. Să considerăm un disc de

rază r , lovit de o undă acoustică, a cărei direcție de propagare face un unghi Φ cu axa discului (fig. 1.14). Așa cum s-a arătat, o parte din energia acoustică incidentă este difuzată de suprafața discului. Pentru simplificarea problemei să considerăm că am obține același efect de la o sursă punctuală situată în centrul discului care ar radia această energie. Rezultă în acest caz o undă sferică.

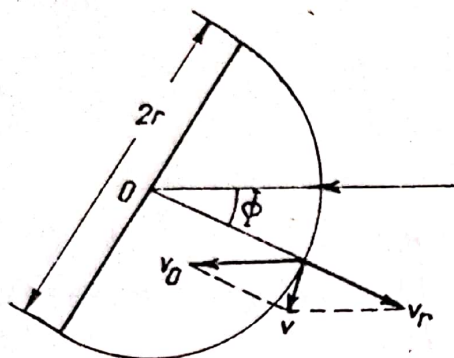


Fig. 1.14. Difrakția undelor acustice.

Viteza particulei și presiunea acoustică, în cazul unei incidente plane, considerată chiar în punctul în care unda lovește suprafața obstacolului, sînt date de relațiile

$$\begin{aligned} v_0 &= V_0 \sin \omega t \\ p_0 &= \rho c V_0 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (1.85)$$

Viteza particulei și presiunea acoustică într-un punct M aflat pe axa discului și la o distanță r de suprafața acestuia, corespunzătoare unei sferice generate de sursa punctiformă O , sînt date de relațiile

$$\begin{aligned} v_r &= -V'_0 \sin (\omega t - kr) \\ p_r &= \rho \omega \frac{V_0}{\sqrt{\frac{1}{r^2} + k^2}} \sin (\omega t - kr) \end{aligned} \quad (1.86)$$

în care $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, iar $V'_0 = V_0 \cos \Phi$.

Ca urmare a interferenței celor două unde (incidentă și difuzată), presiunea acoustică rezultantă în punctul M este

$$p_\Phi = p_0 + p_r \quad (1.87)$$

iar raportul dintre presiunea acoustică rezultantă și presiunea acoustică a unei incidente este

$$\frac{p_\Phi}{p_0} = 1 + \frac{p_r}{p_0}. \quad (1.88)$$

Introducînd în (1.88) expresiile presiunilor acustice date de (1.85) și (1.86) se obține

$$\frac{p_\Phi}{p_0} = 1 + \frac{\omega \cos \Phi}{c \sqrt{\frac{1}{r^2} + k^2}} \frac{\sin (\omega t - kr)}{\sin \omega t} \quad (1.89)$$

sau

$$\frac{p_{\Phi}}{p_0} = 1 + \frac{k_r \cos \Phi}{\sqrt{1 + (kr)^2}} \frac{\sin(\omega t - kr)}{\sin \omega t}. \quad (1.89)$$

Punînd în evidență raportul dintre dimensiunea obstacolului (raza r a discului) și lungimea de undă, relația (1.89) se mai poate scrie

$$\frac{p_{\Phi}}{p_0} = 1 + \frac{2\pi \frac{r}{\lambda} \cos \Phi}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{r}{\lambda}\right)^2}} \frac{\sin\left(\omega t - 2\pi \frac{r}{\lambda}\right)}{\sin \omega t}. \quad (1.90)$$

Din această relație rezultă că presiunea acustică într-un punct aflat la o distanță r de centrul discului, variază cu direcția pe care este plasat acest punct și cu lungimea de undă, respectiv cu frecvența ultrasunetelor. Pentru $\Phi = 90^\circ$, adică pe o direcție de-a lungul discului $p_{\Phi} = p_0$, cu alte cuvinte presiunea acustică totală este egală cu presiunea undei incidente. Presiunea devine maximă și egală cu $2p_0$ pentru puncte situate pe o direcție normală la suprafața obstacolului ($\Phi = 0^\circ$), în sensul incidenței undelor în cazul frecvențelor ridicate. Tot în domeniul acestor frecvențe, presiunea acustică devine minimă și egală cu zero pentru $\Phi = 180^\circ$, adică pe o direc-

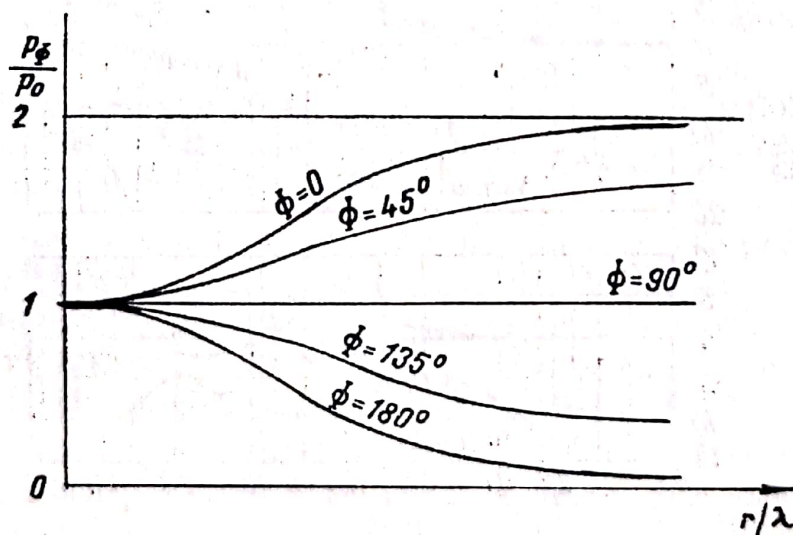


Fig. 1.15. Curbele de variație a raportului p_{Φ}/p_0 în funcție de r/λ .

ție normală la suprafața obstacolului și în spatele acestuia. Ținînd seama și de frecvența undei acustice, cele arătate mai sus pot fi concretizate în diagrama din fig. 1.15. Se observă că în fața obstacolului sunetul difuzat

întărește în general sunetul incident, pe cînd în spatele obstacolului se creează o „zonă de umbră”. Aceste efecte sînt cu atît mai pronunțate cu cît raportul dintre dimensiunile liniare ale obstacolului și lungimea de undă a ultrasunetului este mai mare. Deci fenomenul este mai pronunțat în domeniul ultrasunetelor decît în cel al sunetelor.

Dacă se ia logaritmul raportului presiunilor acustice indicat de relația (1.90), se obține diferența de nivel acoustic în decibeli. În urma măsurărilor efectuate, interpunîndu-se în calea undelor acustice corpuri de diferite forme (cilindru, cub și sferă) și de diferite dimensiuni, pe care undele plane le ating sub unghiuri de incidență variabile, au rezultat valorile corespunzătoare ale diferențelor de nivel de presiune acoustică. Pe baza

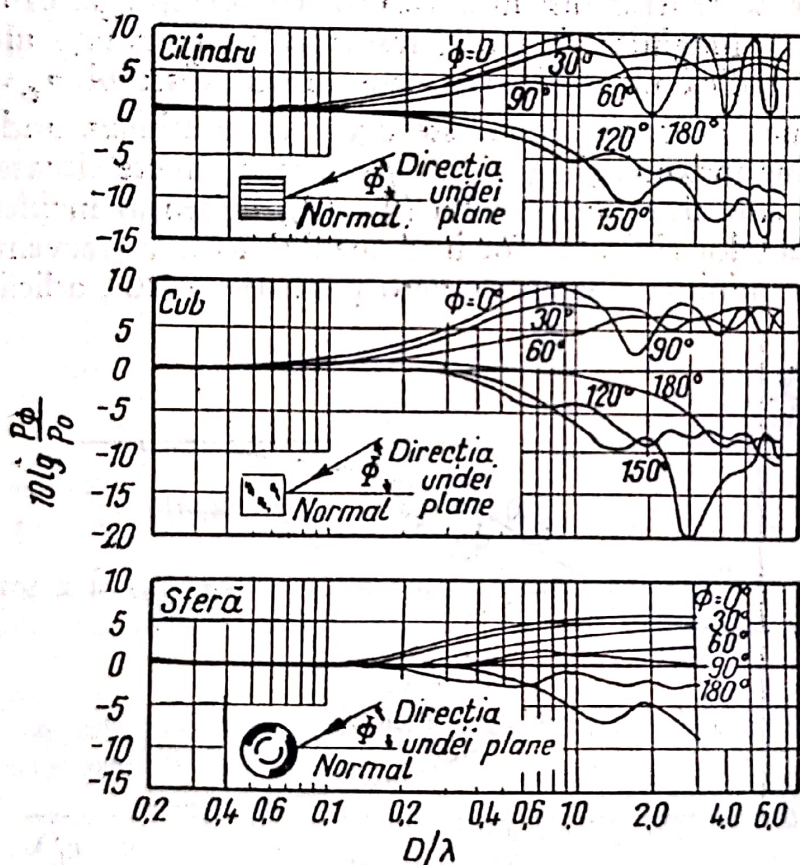


Fig. 1.16. Difrakția undelor acustice datorită unor corpuri de forme diferite.

acestor date au fost trasate curbele din diagramele din fig. 1.16, în care în abscisă sînt indicate raportul dintre dimensiunile obiectului și lungimea de undă a sunetului, iar în ordonată diferența de nivel.

Datorită faptului că difuzia undelor acustice de către un obstacol face ca o parte din energia transportată de undă să se împrășteie în mediu, ea contribuie la atenuarea ultrasunetelor în propagarea lor într-un mediu. Fenomenele de difracție și de difuzie a undelor ultrasonice joacă un rol important în procesul de detectare și de definire a defectelor dintr-un mediu, avînd în vedere că un asemenea defect nu este altceva decît un obstacol interpus în calea propagării undelor. De asemenea, pe baza acestor două fenomene este posibil să se determine mărimea granulelor unui anumit material.

1.8. PRESIUNEA DE RADIAȚIE ACUSTICĂ

Un fascicul de unde ultrasonice lovind suprafața de separație a două medii în contact, cu proprietăți elastice diferite, exercită asupra acestei suprafețe o anumită forță, atribuită *presiunii de radiație acustică* (π). Această forță depinde de intensitatea undelor, de proprietățile elastice ale celor două medii în contact, de orientarea suprafeței de separare în raport cu direcția de propagare a undelor, precum și de aria suprafeței pe care se exercită acțiunea fasciculului ultrasonic.

Spre deosebire de presiunea acustică instantanee, care este o mărime variabilă în timp, presiunea de radiație acustică are o valoare constantă pentru o anumită vibrație acustică într-un mediu dat, timp cît factorii menționați mai înainte nu se schimbă.

Pentru a stabili expresia presiunii de radiație acustică vom folosi teoria dată de Hueter și Bolt. Considerăm un fascicul de unde plane care se propagă într-un mediu fluid. În cîmpul acustic particulele mediului vor intra în vibrație cu o viteză $u = U \cos(\omega t - kx)$, iar presiunea acustică în direcția de propagare a undei va fi ($p = \rho c u$).

Fie V_0 un element de volum din mediul de propagare a undei avînd densitatea ρ_0 . Dacă perturbația are loc de-a lungul axei x -ilor, forța care la un moment dat acționează pe fața $ABCD$ a paralelipipedului considerat este F , iar forța care acționează pe fața $EFGH$ a aceluiași paralelipiped este $F + dF$ (fig. 1.17). După un interval de timp dt , elementul de volum suferă în același timp o deplasare și o deformare. Toate particulele care se aflau inițial în planul $ABCD$ se găsesc de această dată în planul $A'B'C'D'$, deplasarea lor fiind egală cu ξ , iar punctele aflate inițial în planul $EFGH$ se găsesc de această dată în planul $E'F'G'H'$,

fiind deplasate cu cantitatea $\xi + d\xi$. În felul acesta volumul s-a modificat cu cantitatea dV . Variația relativă a densității este

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = -\frac{dV}{V_0} \quad (1.91)$$

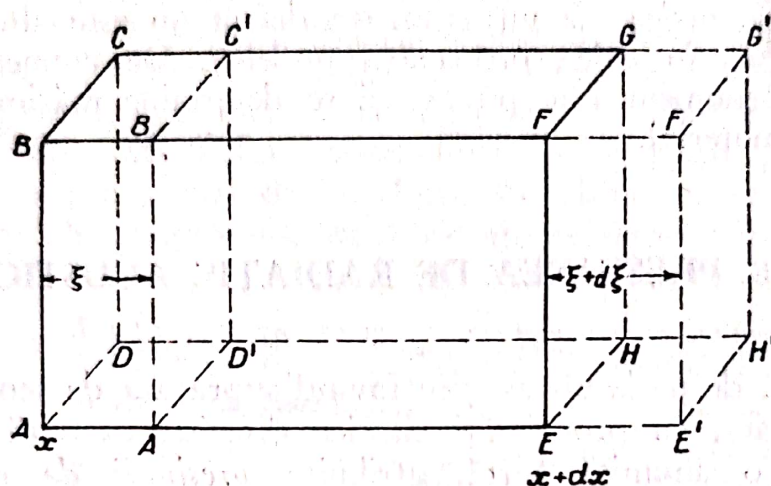


Fig. 1.17. Deplasarea și deformarea unui element de volum la propagarea unei unde acustice.

și întrucât în timpul transformării adiabactice

$$\frac{dP}{P_0} = \kappa \frac{dV}{V_0} \quad (1.92)$$

unde κ este raportul căldurilor specifice și P_0 presiunea statică, se obține pentru presiunea acustică

$$dP = p = \kappa P_0 \frac{d\rho}{\rho_0}. \quad (1.93)$$

Pe de altă parte, intervenind o modificare și a densității, aceasta devine

$$\rho = \rho_0 + d\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{p}{\kappa P_0} \right)$$

de unde

$$p = \rho c u = \rho_0 c \left(1 + \frac{p}{\kappa P_0} \right) u. \quad (1.94)$$

Înlocuind pe p din cel de-al doilea termen al parantezei cu expresia $\rho c u = (\rho_0 + d\rho) c u$, rezultă

$$p = \rho_0 c u \left[1 + \frac{(\rho_0 + d\rho) c u}{\kappa P_0} \right].$$

Neglijînd termenul de corecție $\delta\rho$ și ținînd seama de expresia vitezei particulei, se obține

$$p = \rho_0 c U \cos(\omega t - kx) + \frac{\rho_0^2 c^2 U^2 \cos^2(\omega t - kx)}{\kappa P_0}. \quad (1.95)$$

Cum integrala primului termen al relației (1.95) este zero, integrala care dă valoarea presiunii de radiație se reduce la

$$\Pi = \frac{1}{2} \frac{\rho_0^2 c^2 U^2}{\kappa P_0}. \quad (1.97)$$

Cum însă $c^2 = \frac{\kappa P_0}{\rho_0}$ rezultă

$$\Pi = \frac{1}{2} \rho_0 U^2. \quad (1.98)$$

Deoarece în cazul undelor acustice plane intensitatea acustică se exprimă în funcție de viteza particulei prin expresia $I = \frac{1}{2} \rho_0 c U^2$, rezultă că presiunea de radiație mai poate fi scrisă și sub forma

$$\Pi = \frac{I}{c} = E \quad (1.99)$$

unde E este densitatea de energie acustică. Din această relație se vede că presiunea de radiație acustică este de natura unei densități de energie și, în consecință, se măsoară în ergi pe centimetru la puterea a treia.

În cazul particular al unei suprafețe de separare a mediilor perfect absorbante, în care caz nu se produc unde reflectate, densitatea de energie totală este egală cu densitatea de energie acustică incidentă, iar presiunea de radiație este dată de relația (1.99). Dacă suprafața de separare a mediilor este perfect reflectantă, atunci presiunea de radiație este egală cu dublul densității de energie acustică, adică

$$\Pi = 2E. \quad (1.100)$$

În realitate, suprafețele de separare a două medii nefiind nici perfect reflectante și nici complet absorbante din punct de vedere acustic, presiunea de radiație are o valoare cuprinsă între E și $2E$, depinzînd de coeficientul de absorbție acustică a suprafeței de separare.

Atunci cînd fasciculul ultrasonic nu cade normal pe o suprafață perfect reflectantă, ci sub un unghi de incidență θ , expresia presiunii de radiație acustică ia forma

$$\Pi = 2E \cos^2 \theta. \quad (1.101)$$

Această relație, similară cu cea care exprimă presiunea de radiație a luminii, a fost stabilită și de Rayleigh, care ulterior considerînd propa-

garea undelor acustice ca un proces adiabatic, a ajuns la un rezultat diferit de primul, stabilind pentru presiunea de radiație acustică o nouă relație, avînd forma

$$\Pi = \frac{\kappa+1}{2} E \quad (1.102)$$

unde κ este raportul căldurilor specifice.

Un studiu detaliat al problemei a fost efectuat de Léon Brillouin, care a stabilit pentru presiunea de radiație acustică o expresie generală de forma

$$\Pi = E \left(\cos^2 \theta + \frac{\rho}{c} \frac{dc}{d\rho} \right) \quad (1.103)$$

în care c este viteza de fază și ρ densitatea fluidului.

Considerînd un gaz perfect conținut într-un volum închis, în fiecare punct al mediului existînd o densitate de energie acustică E , cel de-al doilea termen din paranteză devine egal cu $\frac{\kappa-1}{2}$, iar pentru $\theta=0$, se regăsește expresia (1.102) a presiunii de radiație acustică.

Pe cale experimentală au putut fi puși în evidență cei doi termeni ai presiunii de radiație acustică — termenul dirijat și termenul izotrop — conținuți în relația (1.103).

Trebuie observat că presiunea de radiație, întocmai ca și presiunea acustică, este rezultatul mișcării alternative a particulelor unui fluid de o parte și de alta a poziției lor de echilibru și nu se datorește unei deplasări continue a acestor particule. O asemenea deplasare a particulelor, cu alte cuvinte un curent continuu de particule, are totuși loc într-un gaz sau într-un lichid, la propagarea undelor acustice independent de mișcarea alternativă a particulelor. Acest fenomen ia naștere în cazul propagării undelor de amplitudine finită, iar curentul continuu produs este cunoscut sub denumirea de „vînt de cuarț” sau „vînt sonic”.

1.9. ATENUAREA ENERGIEI ACUSTICE

În propagarea sa printr-un mediu elastic, unda acustică pierde treptat din energia pe care o avea inițial, suferind în acest mod o atenuare. În cazul undelor longitudinale plane atenuarea provine din:

— împrăștierea unei părți din energia conținută în fasciculul de unde acustice, împrăștiere cauzată de reflexie, dar mai ales de difuzie;

— absorbția energiei acustice, o parte din aceasta rămânând înmagazinată în mediul prin care se propagă unda.

Pierderile de energie cauzate în urma reflexiei sau difuziei sînt datorite neomogenităților și heterogenității structurii prin care se propagă undele. Un mediu heterogen se poate considera acela care conține particule avînd impedanța acustică diferită de cea a mediului înconjurător, și dimensiuni comparabile cu lungimea de undă. Astfel defectele în piesele metalice, granulele din materialele policristaline, aerosolii sau hidrosolii determină lipsa de omogenitate a unui mediu de propagare și fac ca o parte din energia acustică transportată de unde să fie abătută de la direcția de propagare a acestora în urma reflexiei și difuziei, după care energia este consumată în mediu, fiind transformată în energie calorică.

Pierderile de energie prin absorbție sînt caracteristice unui anumit mediu prin care trece unda și evaluarea acestora poate procura informații cu privire la proprietățile fizice ale mediului. Ele sînt datorite mai multor cauze care vor fi examinate în detaliu în capitolul 3, în cadrul fiecărei categorii de mediu: gazos, lichid și solid.

Cînd propagarea undei acustice are loc într-un mediu în care se produc pierderi de energie, ecuația diferențială a mișcării devine

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{R}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.104)$$

în care R este un factor de natura unei rezistențe, ce ține seama de pierderile menționate mai sus.

Soluția ecuației (1.104) este

$$p = P_1 e^{-(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t} + P_2 e^{(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t} \quad (1.105)$$

în care α este constanta de atenuare ($\alpha = \frac{R}{2\omega\rho_0}$), reprezentînd scăderea presiunii acustice pe unitatea de lungime, iar β constanta de fază ($\beta = \omega/c$), reprezentînd schimbarea fazei pe unitatea de lungime (se exprimă în radiani pe centimetru).

Mărimea complexă

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.106)$$

se numește *constanta de propagare a undei*.

În cazul undelor plane progresive, variația presiunii acustice în funcție de distanță, ținînd seama de atenuare, este

$$p = P_0 e^{-\alpha x} \quad (1.107)$$

iar variația intensității acustice este

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (1.108)$$

în care P_0 și I_0 sînt respectiv presiunea și intensitatea acustică inițială. Această lege își menține valabilitatea și în cazul amplitudinii vibrațiilor ultrasonice.

În cele de mai sus s-a presupus că α nu depinde de x , deși în unele cazuri constanta de atenuare variază cu distanța. În două puncte situate pe direcția de propagare a undei la distanțele x_1 și x_2 ($x_1 < x_2$), cunoscînd intensitățile acustice corespunzătoare I_1 și I_2 ($I_1 > I_2$), din relația (1.108) se poate scoate valoarea constantei de atenuare

$$\alpha = \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \frac{I_1}{I_2}. \quad (1.109)$$

Constanta de atenuare se exprimă în neperi pe unitatea de lungime, de obicei centimetru. Se mai poate exprima și în decibeli pe unitatea de lungime, ținînd seama de relația de legătură

$$\text{dB/unitatea de lungime} = 8,686 \text{ neperi/unitatea de lungime}.$$

În domeniul ultrasunetelor de frecvențe relativ scăzute, pînă la aproximativ 1 MHz, constanta de atenuare variază proporțional cu pătratul frecvenței, din care cauză se obișnuiește să se indice valoarea raportului α/f^2 . La frecvențe de ordinul megaherților, această lege de variație nu se mai menține, intervenind fenomene care vor fi examinate în cadrul capitoului 3.

În general, undele ultrasonice suferă o atenuare mai mare în gaze decît în lichide și mai mare în lichide decît în corpuri solide. Aceasta face ca distanțele pînă unde se pot propaga undele ultrasonice în fluide să fie mai scăzute decît cele din mediul solid. Propagarea cu atenuări reduse a undelor ultrasonice în medii solide, a contribuit substanțial la dezvoltarea și aplicarea pe scară largă, în practică, a metodelor ultrasonice de măsurare și de control în aceste medii.

BIBLIOGRAFIE

1. Bădărău, E., Grumăzescu, M., *Bazele acusticii moderne*. Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1961.
2. Blitz, J., *Fundamentals of ultrasonics*, Butterworths, London, 1963.
3. Malecki, I., *Teoria fal i ukladow akustycznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1964.
4. Rosenberg, L. D., *Primenenia ultrazvuka*, Izdat. Acad. Nauk SSSR., Moscva, 1957.

5. * * * *Handbuch der Physik*, vol. XI/1 și vol. XI/2, Springer Verlag, Berlin, 1962.
6. Kolsky, H., *Stress Waves in solids*, Oxford University Press, London, 1953.
7. Bergmann, L., *Der Ultraschall und seine Anwendung in Wiessenschaft und Technik*, Hirzel Verlag, Stuttgart, 1954.
8. Brehovskih, L. M., *Volnî v sloistîih sredah*, Izdat. Acad. Nauk SSSR., Moscva, 1957.
9. Richardson, E. G., *Ultrasonic Physics*, Ed. Elsevier, Amsterdam, 1962.
10. Mason, W. P., *Physical Acoustics*, vol. I, Partea A., Academic Press, New York, 1964.
11. Sharman, R. V., *Vibrations and Waves*, Butterworths, London, 1963.
12. Herrey, E., *Experimental Studies on Acoustic Radiation Pressure*, J.A.S.A., 27, 5, 891—896, 1955.
13. Victorov, I. A., *Relevskie volnî v ultrasvukovo diapazone ciastot*, Akusticeski jurnal, 7, 2, 153—167, 1962.
14. Post, E. J., *Radiations pressure and disperssion*, J.A.S.A., 25, 1, 55—60, 1953.
15. Leitner, A., *Diffraction of Sound by a Circular Disk*, J.A.S.A., 21, 4, 331—334, 1949.
16. Wiener, F. M., *The diffraction of Sound by Rigid Disks and Rigid Square Plates*, J.A.S.A., 21, 4, 334—347, 1949.
17. Awatani, J., *Note on Acoustic Radiation Pressure*, J.A.S.A., 29, 3, 392, 1957.

2

PRODUCEREA ULTRASUNETELOR

2.1. GENERALITĂȚI

Pentru a putea fi produs, într-un mediu, un anumit tip de undă acustică este necesar ca sursa acustică să vibreze și să transfere mediului înconjurător energie sub forma undelor respective. După principiul care stă la baza generării undelor acustice, există două mari categorii de emițătoare ultrasonice:

- emițătoare mecanice, la care energia folosită pentru producerea vibrațiilor este energia mecanică;

- emițătoare electroacustice, la care energia folosită pentru producerea vibrațiilor este energia electrică. La baza construcției unor asemenea emițătoare stau diferite tipuri de transductoare electromecanice: piezoelectric, magnetostrictiv și electromagnetic.

Emițătoarele ultrasonice pot fi create să emită energie în mod continuu sau să emită semnale scurte, impulsuri ultrasonice.

2.2. EMIȚĂTOARE MECANICE

Emițătoarele mecanice sînt utilizate pentru producerea undelor ultrasonice în medii lichide și în gaze. După modul în care sînt construite se disting: fluierile și sirenele ultrasonice.

2.2.1. Fluier ultrasonice. Primul dispozitiv care a permis generarea de unde ultrasonice într-un gaz a fost *fluierul lui Galton* (fig. 2.1). Acesta

constă dintr-o cavitate de dimensiuni reduse, așezată în fața unui ajutoraj de formă cilindrică, prin care circulă cu viteză mare un curent de aer introdus cu ajutorul unui compresor. Cavitățile rezonatoare și ajutorajul sînt dispuse coaxial, iar distanța dintre ele poate fi reglată. Jetul de aer ieșit din ajutoraj întîlnește cavitatea rezonantă, care începe a vibra, producînd un sunet de margine ce se propagă în mediul înconjurător.

Frecvența fundamentală a sunetului emis depinde de presiunea și temperatura aerului sau, în general, a gazului care străbate ajutorajul, de adîncimea cavității rezonatoare și de viteza de propagare a sunetului în gazul respectiv. Ea poate fi calculată cu relația

$$f_0 = c \sqrt{\frac{1 + T/273}{4(l+k)}} \quad (2.1)$$

în care c este viteza de propagare a undelor în gazul care trece prin fluier, T temperatura absolută a mediului, l adîncimea cavității rezonatoare, iar k o constantă ce depinde de presiunea gazului și are valorile:

p [kgf/cm ²]	0,03	0,07	0,40
k [mm]	7,3	6,2	4,7.

Pe lîngă tonul de bază, se mai formează o serie de componente superioare ale acestuia, însă de intensități mult mai scăzute. Dacă adîncimea cavității rezonatoare este astfel aleasă încît frecvența proprie a coloanei de aer sau de gaz pe care o conține să fie un multiplu al frecvenței fundamentale, coloana vibrează și produce un sunet amplificat. Prin schimbarea adîncimii camerei de rezonanță, alegîndu-se valori mici ale acestuia, pot fi obținute ultrasunete de diferite frecvențe.

În general, cu un fluier Galton nu pot fi generate ultrasunete avînd frecvențe mai mari de 25 kHz, datorită faptului că, marginile ajutorajului producînd vibrații multiple, intensitatea ultrasunetului de bază nu depășește pe cea corespunzătoare componentelor sale superioare. O creștere a frecvenței este totuși posibilă atunci cînd în locul aerului se folosește un alt gaz în care viteza sunetului are o valoare mai mare decît în aer,

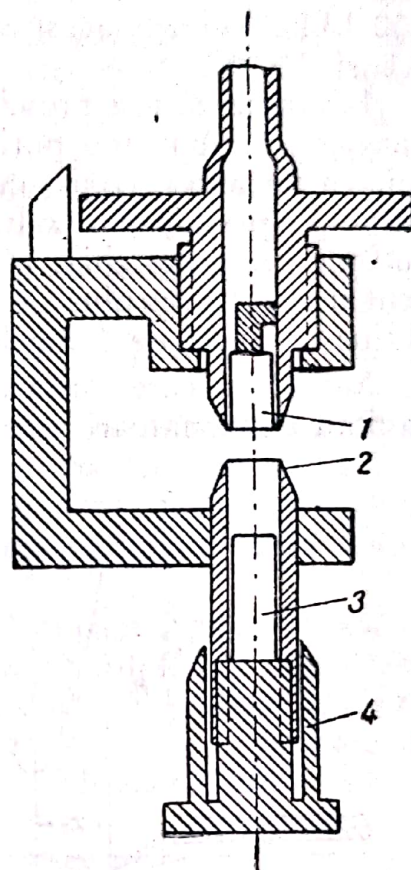


Fig. 2.1. Fluierul lui Galton:
1 — ajutoraj; 2 — margine ascuțită;
3 — piston; 4 — șurub micrometric.

deoarece așa după cum rezultă din relația (2.1) frecvența variază direct proporțional cu această viteză. Folosindu-se un jet de hidrogen, în care viteza de propagare a undelor acustice este de aproximativ patru ori mai mare decât în aer, pot fi obținute ultrasunete pînă la frecvența de 100 kHz. Puterea acustică a unui asemenea emițător este cuprinsă între 0,1 și 10 W.

Bazat pe același principiu ca și fluierul lui Galton, *fluierul Hartmann* lucrează într-un mod puțin diferit. La acesta, ajutorul cilindric este înlocuit cu un ajutor conic, ceea ce face ca în conformitate cu principiul lui Bernoulli presiunea gazului să descască, în schimb viteza sa să crească, putîndu-se ajunge chiar la viteze supersonice ale curentului de gaz. Astfel, pentru aer un surplus de presiune de 0,9 atm este suficient pentru a se obține o viteză de 1 mach.

Modul în care variază presiunea în spațiul dintre gura ajutorului și cavitatea rezonatoare este arătat în fig. 2.2. Presiunea atinge un minim

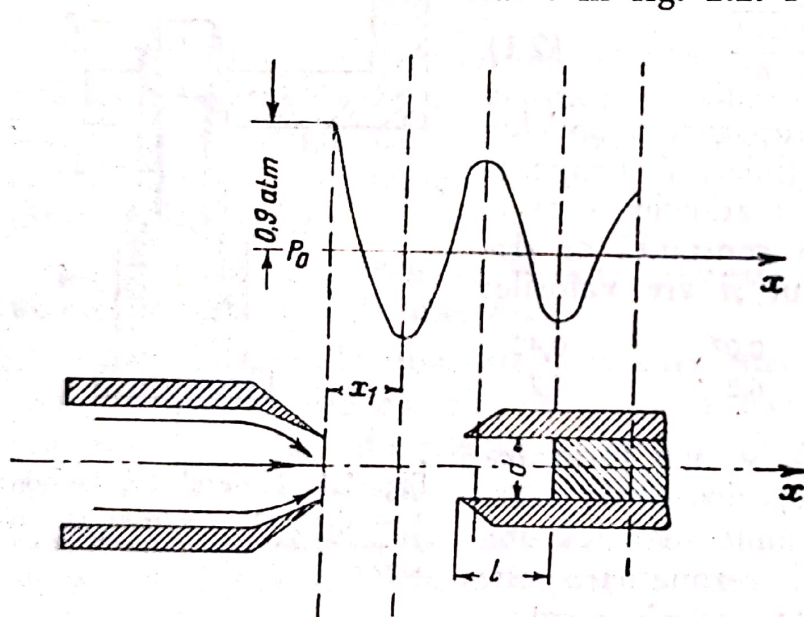


Fig. 2.2. Variația presiunii în spațiul dintre gura ajutorului și cavitatea rezonatoare.

într-un punct aflat la o distanță x_1 de gura ajutorului, unde viteza jetului devine egală cu viteza sunetului. În acest punct, gazul înconjurător se precipită și ia naștere o undă de șoc. În punctele următoare presiunea devine din nou maximă și ciclul se repetă ca mai înainte. Deci distribuția presiunii în lungul jetului este periodică și zonele în care presiunea crește sînt zone de instabilitate. Dacă în apropiere

rea unei asemenea zone se așază o cavitate rezonatoare, gazul din interiorul acesteia capătă vibrații cu o frecvență fundamentală

$$f_0 = \frac{c}{4(l + 0,3d)} \quad (2.2)$$

în care l este lungimea cavității rezonatoare, în mm și d diametrul cavității rezonatoare, în mm.

În practică, cu ajutorul fluierului Hartmann pot fi obținute ultrasunete de frecvențe mai ridicate decât în cazul fluierului lui Galton. Astfel pentru $l=d=1$ mm, se obține în aer un ultrasunet având frecvența egală cu 64 kHz. Prin variația diametrului ajutajului d_0 , a volumului cavității rezonatoare, cât și a naturii și presiunii gazului, pot fi create emițătoare de ultrasunete cu diferite frecvențe, dar și de diferite puteri acustice și randamente. Valoarea optimă a raportului d/d_0 , pentru a se obține puterea maximă radiată, este cuprinsă între 1,27 și 1,40. Randamentul (definit ca raportul dintre energia acustică obținută și energia mecanică consumată) al unui asemenea emițător este de $\sim 5\%$, însă pot fi realizate cu ușurință puteri acustice considerabile. Astfel, cu ajutorul unui fluier Hartmann, la care $l=d=1,2$ mm, s-a obținut o putere acustică de la 5 W pînă la 50 kHz, iar pentru $l=d=4,5$ mm, o putere acustică de la ~ 100 W pînă la ~ 15 kHz.

Suflul puternic datorit jetului de gaz constituie o deficiență a fluierelor ultrasonice. De aceea, la fluierele Hartmann moderne se caută a se separa, prin intermediul unei membrane, câmpul acustic de curentul de gaz. În felul acesta se formează o cameră de rezonanță, al cărei volum poate fi reglat după necesități.

Un alt tip de fluier ultrasonic, conceput de Vonnegut, este *fluierul cu vârtej*. El este alcătuit dintr-o cavitate cilindrică, în interiorul căreia este introdus, prin intermediul unui tub, gazul sub presiunea p_1 . Datorită vitezei mari de scurgere a gazului, acesta capătă în cavitate o mișcare de rotație, producîndu-se în felul acesta un vârtej. Efectuînd mișcarea de rotație, curentul de gaz scapă printr-o deschidere circulară și, ca urmare, iau naștere ultrasunete, ale căror frecvențe depind de presiunea gazului (fig. 2.3). Frecvența fundamentală se poate calcula cu ajutorul relației aproximative

$$f_0 = k \frac{c}{\pi D} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_2}} \quad (2.3)$$

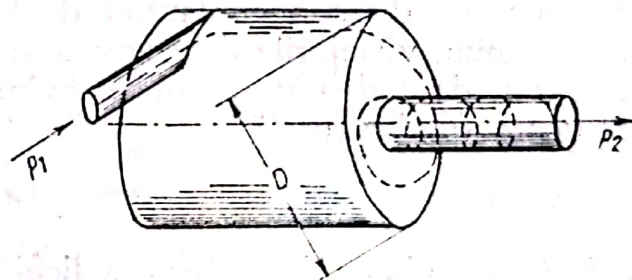


Fig. 2.3. Fluierul cu vârtej.

unde k este o constantă mai mică decât 1, care indică reducerea vitezei de rotație a curentului de gaz datorită frecărilor acestuia de pereții cavității, c viteza undelor acustice prin gaz, D diametrul cavității cilindrice, p_1 presiunea gazului la intrare, p_2 presiunea gazului la ieșire.

Fluierul construit de Vonnegut lucrează la o frecvență de ~ 15 kHz, atît în aer cît și în apă.

Folosirea ultrasunetelor în lichide a făcut necesară producerea acestora și în asemenea medii. Teoretic, tipurile de fluier descrise mai sus pot fi utilizate și pentru generarea undelor ultrasonice în lichide. Astfel, Crawford a proiectat un fluier cu curent de lichid bazat pe fluierul Galton, iar Greguss a adaptat fluierul cu vârtej pentru a lucra în medii lichide.

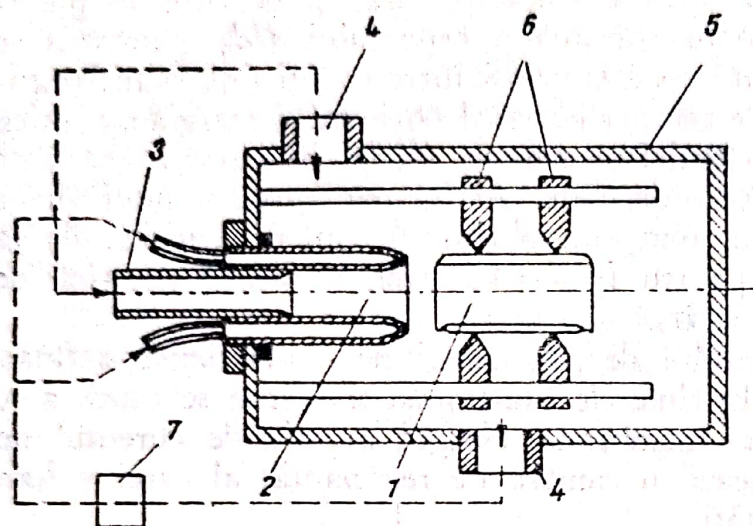


Fig. 2.4. Emițător ultrasonic cu jet de lichid:

1 — tub; 2 — ajutoraj; 3 — cavitate; 4 — tuburi de scurgere a lichidului; 5 — vas; 6 — suporturi nodale; 7 — pompă.

Un tip special de emițător mecanic cu jet de lichid este arătat în fig. 2.4. Ieșind cu viteză mare dintr-o fantă îngustă, curentul fluidului întâlnește un obstacol, care are o formă aerodinamică. Ca urmare, se produce în mediul din vecinătatea suprafeței obstacolului un vârtej, cu un surplus de presiune în partea sa centrală, datorită ruperii curentului de lichid de către muchiile ascuțite. În punctul de rupere, stratul marginal se îndepărtează de suprafața obstacolului înspre masa lichidului, transformându-se într-un jet care se deplasează într-o direcție ce face un unghi cu direcția curentului de lichid exterior. Dacă scurgerea are loc continuu, vârtejurile care se succed unele după altele dau naștere unei succesiuni de căderi de presiune, având caracterul unei unde ascuțite cu frecvență fundamentală.

$$f_0 = \frac{v}{h} \left(a + \frac{b}{Re} \right) \quad (2.3)$$

unde v este viteza de scurgere a lichidului în ajutoraj, în cm/s, h distanța de la ajutoraj la marginea anterioară a obstacolului, în cm, a , b coeficienți ce caracterizează mediul și Re numărul lui Reynolds.

În general, raportul b/Re este mic și se poate neglija. Dacă lichidul care se scurge prin ajutoraj este apa, relația (2.3) ia forma

$$f_0 = \frac{0,5v}{h} \quad (2.4)$$

Puterea acustică a emițătorului se mărește dacă obstacolul constituie un dispozitiv vibrator acordat pe frecvența de lucru a emițătorului. Unul

din cele mai cunoscute dispozitive de acest gen este cel construit de W. Janovski și R. Pohlmann. Curentul de lichid, după ce iese din ajutoraj, lovește muchia unei lamele groase, producându-i vibrații de încovoiere. Lamela poate fi fixată în două puncte nodale sau la mijlocul ei.

Frecvența fundamentală a unui astfel de emițător ultrasonic poate fi calculată cu relația

$$f_0 = a \frac{d}{l^2} c_L \quad (2.5)$$

unde d este grosimea lamelei, în cm, l lungimea ei, în cm, c_L viteza de propagare a undelor longitudinale prin materialul din care este confecționată lamela, în cm/s, iar a un coeficient care depinde de modul de prindere a lamelei, avînd valoarea 1,03 în cazul prinderii în două puncte nodale și 1,62 în cazul prinderii la mijloc sau la unul din capete.

Cum viteza de propagare a undelor longitudinale printr-un metal este proporțională cu modulul de elasticitate al acestuia, pentru a mări cît mai mult frecvența ultrasunetului produs, la confecționarea lamelei se folosesc materiale avînd un modul de elasticitate longitudinal ridicat (de exemplu oțel de arcuri). Banda de frecvență a unor asemenea emițătoare este cuprinsă între 5 și 30 kHz, iar intensitatea acustică într-un lichid măsurată în vecinătatea sursei este de 1—2 W/cm².

Fluierile ultrasonice lucrînd cu jet de fluid sînt utilizate în special la prepararea emulsiilor în industria chimică și farmaceutică. În acest caz, lichidele care trebuie emulsionate sînt dirijate prin ajutorajul fluierului și ele însele alcătuiesc jetul de fluid.

Datorită presiunii mari a curentului de lichid la asemenea fluier, toate părțile care vin în contact cu acesta trebuie confecționate din oțel dur pentru a rezista la eroziunea pe care ar produce-o particulele în suspensie din lichid. În același timp, scurgerea fluidului cauzează și o încălzire accentuată a pieselor, astfel încît este necesar ca întregul dispozitiv să fie răcit cu ajutorul unei serpentine exterioare, prin care circulă apa.

2.2.2. Sirene ultrasonice. Asemenea emițătoare s-au dovedit eficiente în generarea undelor ultrasonice de frecvență joasă, însă de intensități mari, în special în gaze. Sînt folosite în procese de coagulare și depunere a aerosolilor aflați în suspensie în aer și de uscare cu ajutorul ultrasunetului. Sirenele ale căror elemente constructive ce ajută la generarea ultrasunetelor sînt mobile, poartă denumirea de *sirene dinamice*, iar cele la care toate elementele ce intră în alcătuirea lor sînt fixe, se numesc *sirene statice*.

Sirene dinamice. Construcția lor se bazează pe principiul cunoscut de la construcția sirenelor generatoare de sunete, anume acel al întreru-

perii în mod ritmic a unui jet de gaz. În felul acesta iau naștere variații de presiune în mediul înconjurător, care se propagă sub formă de unde acustice.

Aerul comprimat, introdus de către o pompă într-o cameră inelară a sirenei, este obligat a trece în mediul înconjurător printr-o serie de ori-

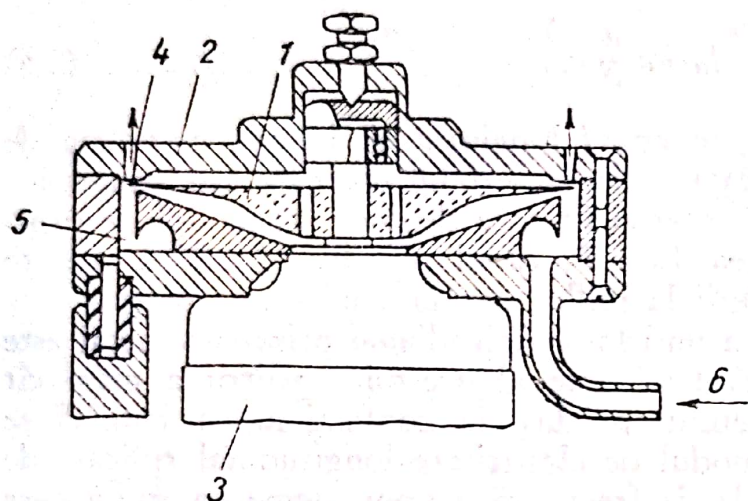


Fig. 2.5. Sirena dinamică:

1 — rotor; 2 — stator; 3 — motor; 4 — orificiu conic; 5 — cameră; 6 — tub pentru introducerea aerului sub presiune.

ficii practicate în lungul circumferinței statorului. Între placa deflectoare și stator este lăsat un mic spațiu de aer, în care se poate roti o placă de asemenea găurită, numită rotor. Acesta este acționat de un motor electric, care-i imprimă o turație apreciabilă. Găurile statorului sînt alternativ deschise și închise în urma rotirii rotorului ceea ce face ca jetul de aer să fie întrerupt periodic (fig. 2.5).

Frecvența ultrasunetului generat de o sirena dinamică depinde de numărul de orificii ale rotorului și statorului m și de turația rotorului n , putînd fi calculată cu relația

$$f_0 = \frac{mn}{60}. \quad (2.6)$$

O sirena avînd 100 orificii și o turație a rotorului de 12 000 rot/min, produce un ultrasunet de o frecvență egală cu 20 kHz. Cu sirene dinamice pot fi generate ultrasunete avînd frecvența maximă de 200 kHz.

Pentru obținerea unui randament cît mai ridicat, este necesar ca la sirenele dinamice să se reducă la minim scurgerile de aer care s-ar produce în spațiul dintre rotor și stator. Aceasta implică o așezare etanșă a rotorului peste stator, lucru care în practică nu este însă posibil, fiind nevoie pentru învîrtirea liberă a rotorului de un anumit spațiu minim. Acest spațiu se poate regla cu ajutorul unui șurub. În plus, pentru a se asigura variații maxime de presiune, diametrul găurilor rotorului este puțin mai mare decît diametrul găurilor practicate în stator.

La alegerea diametrului orificiului avem în vedere asigurarea în timp a unei succesiuni regulate a impulsurilor de comprimare și de rarefiere a

mediului. Pentru aceasta, trebuie ca timpul cât orificiul rămîne deschis să fie egală cu durata închiderii acestuia. Aceasta implică o perfectă egalitate între diametrul găurii și spațiul dintre două găuri consecutive, măsurat pe cercul de așezare a acestora.

Suprafața radiantă a emițătorului poate fi constituită din suprafața rotorului, însă acesta face ca energia acustică să fie dispersată într-un fascicul divergent. Pentru îngustarea acestui fascicul se folosesc pîlnii de diferite forme, aplicate la sirenă. Ele pot avea profilul conic, exponențial sau hiperbolic. Cele mai răspîndite sînt pîlniile exponențiale, cu ajutorul cărora se asigură o mai bună adaptare a impedanțelor, mărindu-se puterea radiată de emițător cu 10%, obținîndu-se în același timp și o mai bună directivitate a sursei.

În mod obișnuit se folosesc sirene ultrasonice avînd puteri acustice pînă la 300 W, însă în cazuri speciale au fost utilizate și sirene dinamice care produc o intensitate acustică de 10 W/cm^2 , pe o suprafață de 1000 cm^2 . Puterea acustică radiată de o sirenă dinamică crește pe măsură ce presiunea aerului comprimat se mărește, dar în același timp întreruperea jetului de gaz se face cu mai multă greutate, necesitînd din partea motorului efectuarea unui lucru mecanic mai mare. În consecință, la asemenea emițătoare puterea electrică a motorului trebuie să fie cît mai mare.

O bună funcționare a unei sirene dinamice implică un ajustaj de înaltă precizie. Datorită faptului că ea comportă organe în mișcare de rotație și că necesită un motor ca să le antreneze, folosirea acesteia în anumite condiții de lucru, cum ar fi temperaturi înalte sau presiuni mari este practic imposibilă. Folosirea sirenei dinamice în asemenea condiții ar duce la dereglarea instalației.

Sirene statice. Sirena statică a fost concepută de către R. Levavasseur pentru a lucra în aer. Se compune din două cavități toroidale, din care una este prevăzută cu o tăietură oblică, subțire. Un jet de aer cu presiune mare intră în tubul așezat între cele două cavități și lovește marginea tăieturii, fiind dirijat spre interiorul uneia din cavități (fig. 2.6). Acest jet intersectează traiectul jetului principal de la extremitatea inferioară a cavității, provocînd astfel întreruperea curentului de aer evacuat în atmosferă. În urma acestui proces se produce o modificare a presiunii

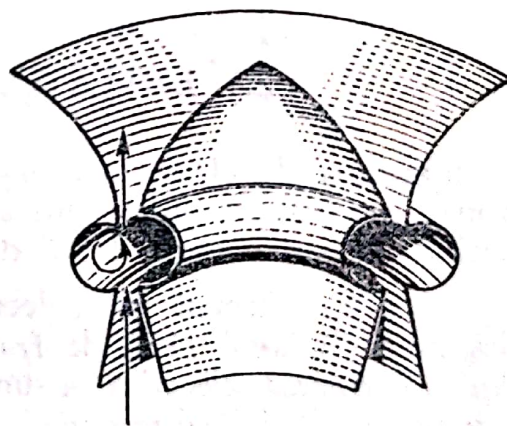


Fig. 2.6. Sirena statică:
1, 2 — cavități toroidale.

în mediul exterior. Fenomenul se repetă periodic și, în felul acesta, printr-o succesiune de variații ale presiunii, sînt generate ultrasunete ale căror frecvențe sînt funcții de ritmul întreruperilor curentului de aer. Aceste întreruperi pot fi asemănate cu cele produse la o sirenă rotativă în urma acțiunii de închidere și de deschidere a orificiilor.

A doua cavitate a sirenei lucrează în contratimp cu cavitatea principală, contribuind la mărirea eficacității mecanismului care provoacă întreruperile. Întocmai ca și în cazul sirenei dinamice, pentru asigurarea unui cuplaj cît mai bun cu mediul înconjurător și sirenele statice sînt prevăzute cu cîte o pîlnie, obișnuit de formă exponențială. În cazul sirenelor care produc ultrasunete, este indicat ca pîlniile să fie foarte alungite pentru a se evita dezlipirea fasciculului ultrasonic de pereții pavilionului.

Pentru a fi obținute puteri cît mai mari prin folosirea emițătoarelor mecanice, s-a căutat să se grupeze mai multe elemente emițătoare (fluier sau sirene statice) la un loc, alcătuiind o baterie. Pentru ca o astfel de instalație să poată funcționa cu un randament bun, fără scurtcircuitări acustice, este necesar ca toate elementele care intră în alcătuirea unei baterii să fie perfect sincronizate în frecvență și fază. Cuplajul dintre elemente poate fi realizat fie practicîndu-se un mic orificiu între cele două cavități rezonatoare a două elemente alăturate, punîndu-se astfel în legătură unul cu celălalt, fie prin intermediul unui tub de lungime convenabilă care face legătura între cavitățile rezonatoare ale tuturor elementelor.

2.3. EMIȚĂTOARE ELECTROMECHANICE

Emițătoarele electromecanice constituie cele mai răspîndite mijloace pentru producerea undelor ultrasonice, în special în medii lichide și solide, putînd acoperi o gamă largă de frecvențe și de puteri.

2.3.1. Emițătorul piezoelectric. Se bazează pe efectul piezoelectric descoperit în anul 1880 de frații Pierre și Jacques Curie și care constă din polarizarea electrică a unor materiale cristaline atunci cînd sînt supuse unor solicitări mecanice. Prin schimbarea sensului solicitării, polarizarea își schimbă și ea sensul. La asemenea materiale are loc și un efect invers; atunci cînd este supus acțiunii unui cîmp electric prin aplicarea unei diferențe de potențial în două puncte determinante ale materialului, acesta este deformat. Deformările își schimbă sensul în momentul în care sensul curentului electric este inversat. Rezultă de aici că prin inversarea periodică a curentului, deci prin aplicarea unei tensiuni alternative, mate-

rialul vibrează, putînd emite în felul acesta unde acustice în mediul înconjurător.

Materiale piezoelectrice. Materialele la care efectul piezoelectric este mai pregnant și care sînt întrebuintate la construcția emițătoarelor ultrasonice sînt cuarțul și turmalina, care cristalizează în sistemul trigonal, sulfatul de litiu, monofosfatul de potasiu și monofosfatul de amoniu, care cristalizează în sistemul tetragonal, precum și sarea Rochelle (sare Segnette), care cristalizează în sistemul rombic. Dintre acestea, cuarțul este utilizat pe scara cea mai largă.

Pentru ca efectul produs de fenomenul piezoelectric să aibă o intensitate maximă, este necesar ca solicitările mecanice să corespundă cu unele direcții speciale ale cristalului de cuarț. De aceea, în scopurile practice se folosesc plăci tăiate din cristalul natural după anumite axe. Pentru localizarea acestora este necesar să se cunoască geometria cristalului.

Cristalul de cuarț este o prismă hexagonală, terminată prin două piramide (fig. 2.7). Acesta are o axă de simetrie nepolară de ordinul trei, numită axă optică, datorită unor proprietăți optice ale acesteia. Axa unește vîrfurile cristalului și este notată în figură cu Z. Perpendicular pe axa optică sînt cele trei axe care unesc vîrfurile opuse ale secțiunii hexagonale ale cristalului, numite axe electrice sau piezoelectrice (X_1 , X_2 , X_3), datorită proprietăților electrice ale acestora. Axele perpendiculare pe fețele opuse ale secțiunii hexagonale sînt axele mecanice (Y_1 , Y_2 , Y_3).

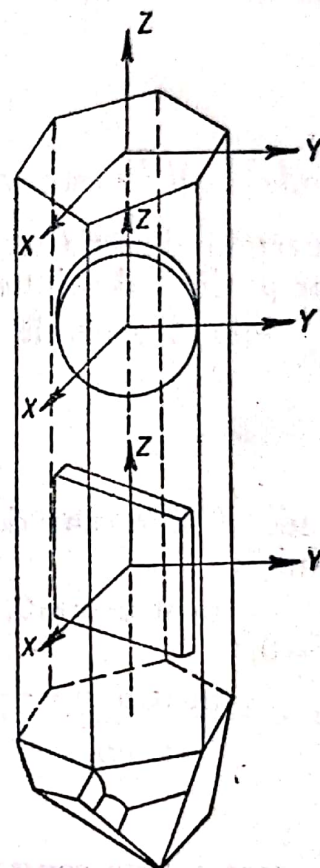


Fig. 2.7. Cristal de cuarț.

Pentru a emite unde ultrasonice, transductorul de forma unei plăci este tăiat din cristal în așa fel încît fețele sale destinate a radia energia acustică să fie perpendiculare pe una din axele piezoelectrice (tăietură X). Aceste fețe opuse sînt acoperite cu un strat conducător, care constituie electrozii transductorului, pentru a da posibilitatea aplicării pe fețele plăcii a unei tensiuni electrice. În majoritatea cazurilor se folosește un film subțire de metal (aluminu, argint sau aur) întins pe suprafața cristalului, fie prin metoda electrolitică, fie prin împrôscarea catodică. La transductoare piezoelectrice de puteri mari, electrozii pot fi constituiți din foi și chiar din plăci metalice.

Aplicînd o tensiune electrică alternativă pe fețele opuse, perpendiculare pe axa X , placa de cuarț se va comprima și dilata succesiv în direcția grosimii acesteia cu frecvența tensiunii alternative aplicate. Notînd cu ξ deplasările fețelor opuse ale cristalului de o parte și de alta a poziției pe care o aveau în stare de repaus, în lipsa oricărei tensiuni electrice, ecuația diferențială a vibrației plăcii este

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

unde $c = \sqrt{\frac{E_x}{\rho}}$ este viteza de propagare a undelor acustice în placa de cuarț în direcția x , E_x fiind modulul de elasticitate în aceeași direcție, iar ρ fiind densitatea cristalului.

Soluția generală a acestei ecuații este de forma

$$\xi = e^{j\omega t} \left(A e^{-j\frac{\omega x}{c}} + B e^{j\frac{\omega x}{c}} \right) \quad (2.8)$$

unde A și B sînt două constante complexe care depind de condițiile limită:

- pentru $x=0$, adică la jumătatea distanței dintre fețele metalice, $\xi=0$,
- pentru $x=\pm d/2$, adică la nivelul fețelor metalizate

$$E_x \frac{\partial \xi}{\partial x} = e_1 \frac{V_0}{d} - Z \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (2.9)$$

în care e_1 este constanta piezoelectrică după direcția x , d grosimea plăcii, $Z \frac{\partial \xi}{\partial t}$ excesul de presiune a fluidului în care se găsește cristalul, iar V_0 amplitudinea tensiunii electrice aplicată celor doi electrozi ai plăcii de cuarț.

Impedanța caracteristică Z a lichidului este $Z = \rho_1 c_1$, unde ρ_1 este densitatea, iar c_1 viteza de propagare a undelor acustice în lichid, dacă dimensiunile cristalului sînt mari în comparație cu lungimea de undă a ultrasunetelor emise.

Ținînd seama de prima condiție limită, din (2.8) se obține $B=A$, iar dacă se folosesc formulele lui Euler, această ecuație se mai poate scrie

$$\xi = -2jAe^{j\omega t} \sin \left(\frac{\omega x}{c} \right). \quad (2.10)$$

Diferențiind expresia (2.10) în raport cu x și cu timpul t și ținând seamă de a doua condiție de limită, în urma unor transformări succesive se obține pentru amplitudinea deplasării expresia

$$\xi = -j \frac{e_1 V_0}{\omega Z d} e^{j(\omega t + \varphi)} \frac{\cos \varphi \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right)}{\sin\left(\frac{\omega d}{2c}\right)} \quad (2.11)$$

unde

$$\varphi = \arctg \left[\frac{E x}{Z c} \cotg \left(\frac{\omega d}{2c} \right) \right] \quad (2.12)$$

Amplitudinea mișcării plăcii depinzând de frecvența tensiunii electrice excitatoare, va deveni maximă (deci se va produce fenomenul de rezonanță) pentru $\cos \varphi = 1$, deci la valoarea $\varphi = 0$. În acest caz, din (2.12) se deduce

$$\frac{\omega_0 d}{2c} = \frac{\pi}{2} \quad (2.12')$$

de unde rezultă valoarea frecvenței de rezonanță a vibrațiilor care se produc după direcția axei x

$$(f_0)_x = \frac{c_L}{2d} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{E_x}{\rho}} \quad (2.13)$$

Dacă vibrația plăcii de cristal are loc după direcția axei y , se poate deduce o relație analogă pentru frecvența de rezonanță și anume

$$(f_0)_y = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_y}{\rho}} \quad (2.14)$$

în care l este lungimea plăcii și E_y modulul de elasticitate în direcția y .

Pentru o placă de cuarț avînd o densitate de $2,65 \text{ g/cm}^3$, modulul de elasticitate fiind $E_x = 8,605 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, respectiv $E_y = 7,87 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, prin aplicarea relațiilor (2.13) și (2.14) se obține

$$(f_0)_x = \frac{285\,000}{d} [\text{Hz}] \quad (2.13')$$

și

$$(f_0)_y = \frac{272\,000}{l} [\text{Hz}] \quad (2.14')$$

unde d și l sînt dimensiunile geometrice ale plăcii de cuarț exprimate în centimetri.

Din relațiile de mai sus rezultă că frecvențele de rezonanță sînt funcție de dimensiunile plăcii de cuarț. Pentru a se obține transductoare care să aibă frecvența de rezonanță cît mai ridicată este necesar ca plăcile să aibă grosimi cît mai mici. Obținerea de plăci de cuarț foarte subțiri este limitată pe de o parte de imposibilitatea de prelucrare a unor plăci prea subțiri, iar pe de altă parte datorită faptului că vibrațiile longitudinale ale plăcii sînt însoțite de contracții transversale care pot distruge cristalul, întrucît în anumite puncte poate fi depășită limita elastică, chiar dacă solicitarea totală este sub limita solicitării admisibile. Astfel, pentru a genera unde longitudinale avînd frecvența de 20 MHz este necesar ca plăcuța de cuarț de tăietură X să aibă o grosime de numai 0,14 mm, devenind foarte fragilă și putînd fi ușor străpunsă de arcul electric.

Din motivele arătate, pentru generarea de unde ultrasonice longitudinale de frecvențe ridicate este necesar să se utilizeze armonicile superioare pe care poate să vibreze placa de cuarț. Cum efectul piezoelectric nu intervine decît atunci cînd pe fețele opuse ale plăcii sînt aplicate sarcini electrice de sens contrar, rezultă că nu pot fi generate decît armonici impare. Într-adevăr, să presupunem că un cristal este excitat la armonica a n -a. În acest caz grosimea lui se poate considera împărțită

în n părți egale, în care apar succesiv eforturi de compresie și de tensiune. Dacă n este un număr par, va exista în cristal un același număr de zone de compresie și de tensiune, așa încît efortul rezultat devine nul. Cînd n este însă un număr impar, după ce un număr egal de compresii anulează tensiunile de același număr, rămîne în cristal o secțiune singulară, fie de compresie, fie de tensiune, datorită căruia placa poate să vibreze (fig. 2.8). Astfel, cu ajutorul unei plăci de cristal

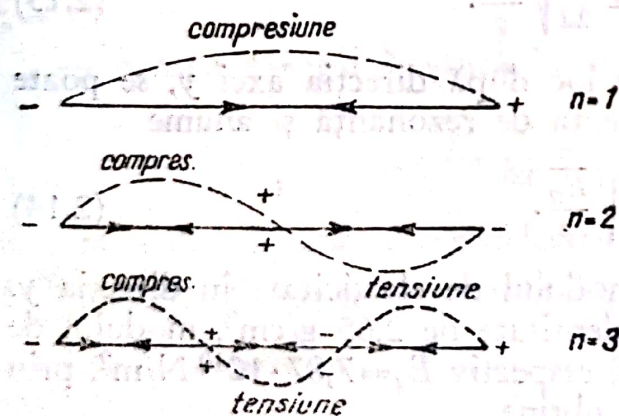


Fig. 2.8. Modul de vibrație a plăcii de cuarț.

de cuarț vibrînd pe a 191-a armonică, pot fi obținute ultrasunete avînd frecvența aproximativ egală cu 55 MHz.

Procedeul arătat mai sus este avantajos cînd nu este necesar să se producă energii acustice mari, deoarece amplitudinile vibrațiilor armonice, deci și energia acustică radiată, sînt mult mai mici decît în cazul

fundamentalei. Pentru obținerea de unde ultrasonice de frecvențe și mai ridicate, se folosesc dispozitive speciale, care vor fi descrise mai departe.

În afară de limita superioară de frecvențe, la un transductor piezo-electric cu cuarț interesează și limita inferioară a frecvenței, care de asemenea este funcție de grosimea plăcii folosite. Astfel, pentru a se putea genera unde longitudinale având frecvența de 100 kHz, trebuie ca grosimea plăcii să fie de ordinul a 28 mm, grosime destul de greu de realizat în practică. În plus, impedanțele electrice mari ale transductorului fac problema greu de rezolvat.

În asemenea cazuri se folosește o construcție stratificată a transductorului, care constă din montarea unei plăci de cuarț între două plăci groase de oțel. Deoarece valoarea vitezei de propagare a undelor longitudinale prin cuarț este apropiată de cea a vitezei de propagare prin oțel, ($c_{\text{cuarț}} = 5\,500$ m/s, $c_{\text{oțel}} = 5\,900$ m/s), întregul sistem vibrează ca o placă unică, a cărei grosime este egală cu grosimea plăcii de cuarț la care se adaugă grosimea celor două plăci din oțel. În felul acesta pot fi obținute transductoare cu cuarț de grosimi apreciabile care generează ultrasunete de frecvențe coborâte (40—50 kHz) folosite în sondajul submarin. P. Langevin a construit un transductor piezoelectric pentru frecvența de 40 kHz, format dintr-o placă frontală de oțel de 3 cm grosime, o placă posterioară tot din același metal, de 0,6 cm grosime și o placă de cristal montată între acestea, de 0,6 cm grosime.

Prin realizarea unui asemenea transductor, amplitudinea vibrațiilor la rezonanță este superioară celei produsă de o placă simplă de cuarț. Ca urmare, pentru a se obține o aceeași amplitudine, tensiunea electrică aplicată armăturilor plăcii devine mai mică.

În cele de mai sus, s-a făcut ipoteza că placa de cuarț vibrează ca un piston rigid, fără să se țină seama că, în realitate, suprafețele cuarțului vibrează în general mult mai neregulat, datorită în primul rând vibrațiilor care apar în direcția transversală. Acestea fac ca distribuția vitezei particulelor să nu mai fie uniformă pe suprafața emitătoare și să existe unele puncte nodale, care rămân în repaus și alte puncte care vibrează intens. Apar astfel figuri Chladni mai mult sau mai puțin complicate. Distribuția neuniformă a vitezei particulei depinde de modul de vibrație a plăcii și de frecvență. Aceasta influențează impedanța de radiație și intensitatea radiației transductorului în lichide. Caracteristica de directivitate diferă și ea față de cea corespunzătoare radiației pistonului rigid, în sensul că se modifică raportul dintre energia acustică concentrată în fasciculul principal și cea existentă în loburile secundare. În cazul unui disc care vibrează puternic la partea sa centrală, caracteristica de direc-

tivitate este constituită numai dintr-un fascicul central fără loburi laterale. Dacă însă discul este determinat să vibreze puternic spre periferia sa, unghiul de deschidere al fasciculului central devine mai mic, iar transductorul devine mai directiv. Apar însă loburi laterale destul de puternice.

Cercetările experimentale au arătat că, pe măsură ce crește directivitatea prin micșorarea unghiului de deschidere a fasciculului principal, se mărește concomitent și intensitatea fasciculelor secundare. Problema care se pune în practică este de a găsi modurile de vibrație ale plăcii care conduc la un fascicul principal cu o deschidere redusă, deci la un fascicul concentrat și la loburi secundare mult atenuate. Cele de mai sus sînt valabile și în cazul emițătoarelor ultrasonice făcute din ceramici feroelectrice polarizate.

În afară de frecvență, alt parametru important în utilizarea cuarțului piezoelectric este energia ultrasonică emisă. Considerînd că placa de cuarț vibrează ca un piston rigid, puterea radiată este proporțională cu suprafața plăcii și cu pătratul amplitudinii vitezei cu care vibrează această suprafață, așa cum s-a arătat la 1.4.2. De exemplu, o placă de cuarț de 0,6 cm grosime și cu o suprafață de 15,2 cm², introdusă într-o baie de ulei de transformator, poate să emită o putere de 12 W, adică cu o intensitate de 0,8 W/cm², cînd i se aplică o tensiune de 8 000 V.

Pentru obținerea de puteri mari, în special la frecvențe joase, este necesar să existe o suprafață de radiație mare. Or, în natură nu este posibil a se găsi cristale omogene din care să se taie asemenea plăci. Totuși, obținerea unor suprafețe de radiații mari s-a putut face prin așezarea alăturată a unor plăci de dimensiuni mici avînd aceeași grosime, tăiate în așa fel încît toate axele lor electrice să coincidă ca direcție și sens. Au fost create în felul acesta mozaicuri de cuarț. Obișnuit, plăcile de cuarț se fixează pe o placă de oțel sau sînt montate între două plăci de oțel, întregul sistem vibrînd ca un tot unitar.

Plăcile de cuarț cu tăietură X sînt întrebuintate pentru generarea undelor longitudinale. În scopul de a se emite unde transversale în solide sau în lichide vîscoase sînt folosite alte moduri de vibrații ale cristalului, în general cel rezultat prin tăierea plăcii după axa Y. După Firestone, pentru ca o placă de cuarț de tăietură Y să lucreze cu maximum de randament în oțel și în aluminiu, trebuie ca dimensiunea sa după axa X să fie de 6—8 ori mai mare decît grosimea după axa Y. În ceea ce privește cea de-a treia dimensiune a plăcii, după axa Z, aceasta se poate lua arbitrar, ea influențînd doar unghiul de deschidere al fasciculului ultrasonic produs.

Cu un transductor piezoelectric mai pot fi generate și unde de torsiune, această în cazul în care transductorul are forma unui cilindru cu axa sa paralelă cu axa electrică și atunci când tensiunea electrică este aplicată pe electrozii dispuși după generatoarea cilindrului, așa cum se arată în fig. 2.9. Frecvența fundamentală pe care vibrează cristalul în acest caz este

$$f_0 = \frac{c_T}{2l} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.15)$$

în care l este lungimea cilindrului, G modulul de elasticitate transversal și ρ densitatea cuarțului.

Știind că viteza undelor transversale în cuarț este de 3 500 m/s, frecvența fundamentală se poate calcula cu relația

$$f_0 = \frac{175\,000}{l} \quad (2.15')$$

unde lungimea cilindrului, este exprimată în centimetri.

Relațiile (2.13') și (2.15') sînt aproximative, ele neluînd în considerare influența exercitată de tipul complementar de vibrație (longitudinal pentru vibrațiile transversale și transversal pentru vibrațiile longitudinale) în raport cu tipul principal de vibrații care se excită.

Comparînd relațiile (2.13') și (2.15') se constată că frecvența fundamentală a vibrațiilor de torsiune este mai scăzută decît cea corespunzătoare vibrațiilor longitudinale.

Datorită faptului că transductorul electromagnetic poate fi considerat ca o formă particulară de cuplaj între un sistem mecanic (placa care vibrează) și un sistem electric (circuitul electric oscilant), în analiza transductorului piezoelectric trebuie avut în vedere și acest cuplaj, a cărui eficacitate depinde de anumite proprietăți electrice și mecanice ale elementului piezoelectric. În acest caz, transductorul piezoelectric poate fi caracterizat prin sistemul de ecuații

$$\begin{aligned} D &= \epsilon E + eT \\ S &= eE + sT \end{aligned} \quad (2.16)$$

în care D este inducția electrostatică rezultată în urma aplicării unui câmp electric E și a unei tensiuni mecanice T , iar S este deformarea re-

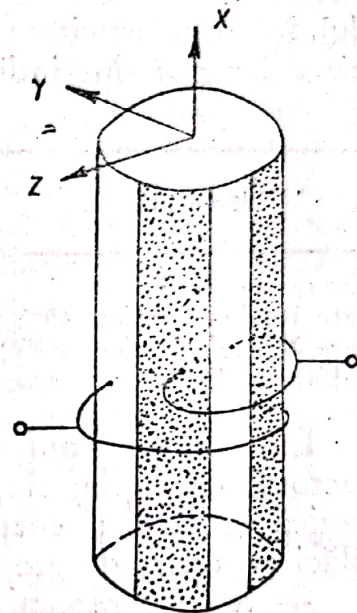


Fig. 2.9. Cilindru de cuarț în vibrație torsională.

zultată prin aplicarea aceluiași câmp electric și a aceleiași tensiuni mecanice.

În relațiile (2.16), ϵ este constanta dielectrică sau permitivitatea elementului piezoelectric considerat ca un dielectric, e este constanta piezoelectrică și s este o constantă elastică a mediului (rigiditatea), inversul modului de elasticitate. Valorile acestor constante pentru diferite cristale piezoelectrice sînt indicate în tabela 2.1.

Tabela 2.1

Materialul	ρ kg/m ³	C^e C/N	s m ² /N	ϵ F/m	k %
Cuarț (tăietură X)	$2,65 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$12,7 \cdot 10^{-12}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	10
Sare Rochelle (tăiet. 45°X)	$1,77 \cdot 10^3$	$435 \cdot 10^{-12}$	$67 \cdot 10^{-12}$	$444 \cdot 10^{-11}$	78
Sare Rochelle (tăiet. 45°Y)	$1,77 \cdot 10^3$	$28 \cdot 10^{-12}$	$99 \cdot 10^{-12}$	$9,8 \cdot 10^{-11}$	29
Sulfat de litiu	$2,06 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^{-12}$	$20 \cdot 10^{-12}$	$9,1 \cdot 10^{-11}$	35

Eficacitatea unui transductor piezoelectric poate fi exprimată prin factorul de cuplaj electromecanic, definit ca raportul dintre energia mecanică produsă și energia totală furnizată sistemului. Cum în cazul unei plăci de cuarț de grosime l și de arie A :

— energia mecanică produsă de transductor este

$$W_m = \frac{1}{2} F^2 C_m$$

unde $C_m = \frac{sl}{A}$ este complianța mecanică, iar F forța care ia naștere;

— energia electrică totală furnizată sistemului

$$W_e = \frac{1}{2} V^2 C_e$$

unde $C_e = \frac{\epsilon A}{l}$ este capacitatea electrică, rezultă pentru factorul de cuplaj electromecanic

$$k^2 = \frac{W_m}{W_e} = \frac{F^2 C_m}{V^2 C_e} \quad (2.17)$$

Pe de altă parte, în cazul cînd cristalul este încastrat, $S=0$, așa încît din relația a doua (2.16) se deduce

$$T = \frac{e}{s} E = \frac{e}{sl} V$$

iar

$$F = \frac{eA}{sl} V$$

Introducînd expresia de mai sus în locul lui F în relația (2.17) și ținînd seama de expresiile lui C_m și C_e , rezultă

$$k^2 = \frac{e^2}{\epsilon s}. \quad (2.18)$$

Se constată că valoarea factorului de cuplaj electromecanic este cu atît mai ridicată cu cît valoarea constantei piezoelectrice, ce caracterizează materialul din punct de vedere al acestui efect, este mai mare și cu cît permitivitatea și rigiditatea sînt mai scăzute. În cazul cuarțului, $k^2 = 0,0095$ sau $k = 0,01$, cu alte cuvinte aproape 10% din energia electrică cheltuită este transformată în energie mecanică. Obişnuit, factorul de cuplaj electromecanic se dă în procente, iar valorile corespunzătoare cîtorva materiale piezoelectrice sînt arătate în tabela 2.1.

În afară de cuarț, un alt material folosit la confecționarea transducătoarelor electromecanice este sarea Rochelle, care este un tartrat dublu de potasiu și sodiu. Cu toate că, așa cum reiese din tabela 2.1, acest cristal are o constantă piezoelectrică cu mult superioară cuarțului, avînd deci și un bun factor de cuplaj, prezintă totuși o serie de inconveniente, ca urmare a unor proprietăți fizice și chimice. Astfel, se deshidratează la umidități mai scăzute de 35%, iar la umidități mai mari de 80% își pierde stabilitatea. Temperatura Curie este relativ coborîtă, iar la o temperatură mai ridicată de 55°C se descompune chimic; în plus, la acest cristal constanta dielectrică de-a lungul axei X variază cu intensitatea cîmpului electric. Pentru $E_x = 5$ V/cm, constanta are valoarea 500, în timp ce la $E_x = 500$ V/cm valoarea lui ϵ devine egală cu 3 300. Toate aceste dezavantaje contribuie la o utilizare mai limitată a sării Rochelle la construcția transducătoarelor destinate emiterii ultrasunetului.

Materiale feroelectrice polarizate. O proprietate generală a materialelor izolante constă în modificarea dimensiunilor lor sub acțiunea unui cîmp electric. Este fenomenul de electrostricțiune, care se deosebește de fenomenul piezoelectric prin următoarele două caracteristici:

— sensul deformării corpului este independent de sensul cîmpului electric aplicat;

— deformarea prin electrostricțiune este mult mai mică decît cea rezultată în urma efectului piezoelectric.

Există totuși unele materiale dielectrice, cum ar fi materialele feroelectrice policristaline, din categoria cărora fac parte ceramicele din titanat de bariu (BaTiO_3), la care efectul electrostrictiv atinge valori apreciabile. Această calitate contribuie la utilizarea acestor ceramice, la construirea transducătoarelor electromecanice. Cum asemenea materiale au o comportare analogă cu cea a materialelor piezoelectrice, de multe ori

transductoarele din titanat de bariu sînt considerate a fi transductoare piezoelectrice.

Ceramica din titanat de bariu se obține din bioxid de titan (TiO_2) și carbonat de bariu (BaCO_3) sub formă de cristale mici legate între ele cu ajutorul unui liant adecvat. Înainte de a fi folosit, materialul se polarizează prin aplicarea unui cîmp electrostatic intens. Ținînd seama că efectul electrostrictiv al ceramicelor policristaline, precum și stabilitatea proprietăților acestora depind într-o mare măsură de procesul de polarizare, acesta trebuie efectuat în anumite condiții. Astfel, polarizarea ceramicelor din titanat de bariu obișnuite se face prin încălzirea materialului la o temperatură superioară punctului Curie (temperatură la care fenomenul de electrostricțiune dispare), aproximativ 125°C , iar pe timpul răcirii sale lente se aplică un cîmp electrostatic constant, a cărui intensitate este de aproximativ $6\,500\text{ V/cm}$. Dacă polarizarea s-ar efectua la temperatura camerei, intensitatea cîmpului aplicat ar trebui să fie de aproape 3 ori mai mare. Durata polarizării este de cel puțin o oră și jumătate. Sub acțiunea cîmpului electrostatic, cristalele individuale se orientează și, în urma procesului de solidificare prin răcire, ele rămîn orientate. Datorită faptului că un cîmp excitator este mai mic în comparație cu cîmpul polarizant, deformările elementului vor fi și ele sinusoidale, avînd aceeași frecvență cu cea a cîmpului excitator.

O problemă importantă care se pune în deosebi la transductoarele de puteri mari este aceea a depolarizării ceramicii. Prin creșterea sarcinii și datorită pierderilor mecanice și electrice din material, pe timpul lucrului se produce o apreciazabilă cantitate de căldură, care duce la o creștere a temperaturii materialului. Ținînd seama că pe măsură ce temperatura se apropie de punctul Curie, se produce o descreștere a tensiunii coercitive, efectul electrostrictiv reducîndu-se treptat, aceasta are o influență asupra funcționării normale a transductorului. Pentru remedierea acestei situații se caută, pe de o parte, să se confecționeze ceramice cu pierderi cît mai scăzute și cu un punct Curie cît mai ridicat și, pe de altă parte, a se face o răcire intensivă a materialului pe timpul lucrului. Posibilitățile de răcire a transductorului sînt însă limitate.

Conductibilitatea termică scăzută a materialului îngreunează mult operația de răcire, în special în cazul cînd grosimea plăcii ceramice este apreciazabilă, adică în cazul transductoarelor care lucrează în domeniul frecvențelor joase. Astfel, o răcire exterioară cu apă nu mai este suficientă atunci cînd se folosesc plăci mai groase de 25 mm . Din acest motiv sînt de preferat transductoarele complexe formate dintr-un mozaic de plăcuțe mici din titanat de bariu de formă hexagonală. Prin crearea de plăcuțe mici și prin lăsarea unui spațiu între aceste plăcuțe, răcirea

se poate efectua cu mai multă ușurință fiind posibilă în felul acesta ridicarea puterii emițătorului fără să existe pericolul unei depolarizări.

Proprietățile elastice, dielectrice și electrostrictive ale transductoarelor cu ceramice din titanat de bariu pot fi modificate după dorință prin includerea în masa ceramicei a unor substanțe izomorfe. În prezent, pe lângă titanat de bariu, există și alte materiale feroelectrice policristaline folosite la emisia de ultrasunete ca miobat de plumb (PbNb_2O_6) sau zirconatul de plumb, cunoscut și sub simbolul PTZ. Unele caracteristici ale acestor ceramice sînt indicate în tabela 2.2.

Tabela 2.2

Materialul	ρ kg/m ³	C/N	E N/m ²	ϵ F/m	k %
Titanat de bariu	$5,7 \cdot 10^3$	$190 \cdot 10^{-12}$	$11,8 \cdot 10^{10}$	$1250 \cdot 10^{-11}$	20—50
PbNb_2O_6	$6,0 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^{-12}$	$2,9 \cdot 10^{10}$	$240 \cdot 10^{-11}$	31
PTZ-4	$7,5 \cdot 10^3$	$235 \cdot 10^{-12}$	$8,1 \cdot 10^{10}$	$875 \cdot 10^{-11}$	63
PTZ-5	$7,7 \cdot 10^3$	$320 \cdot 10^{-12}$	$8,7 \cdot 10^{10}$	$1200 \cdot 10^{-11}$	70

Materialele ceramice pot fi modelate la forma dorită, ceea ce permite să se obțină cu ușurință formele cele mai complicate, cerute în special pentru concentrarea energiei acustice emise. În cazul unei plăci ceramice polarizate după lungimea sa, cîmpul electric alternativ excitator se aplică ca în fig. 2.10. Frecvența de rezonanță a unui asemenea element se poate calcula cu aceeași relație ca în cazul vibrației longitudinale a lamei de cuarț și anume

$$f_0 = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.19)$$

în care d este grosimea elementului, E modulul de elasticitate al materialului considerat în direcția aplicării cîmpului electric și ρ densitatea materialului.

Cunoscînd modulul de elasticitate și densitatea titanatului de bariu rezultă

$$f_0 = \frac{227\,000}{d} \quad (2.19')$$

unde grosimea elementului este exprimată în centimetri.

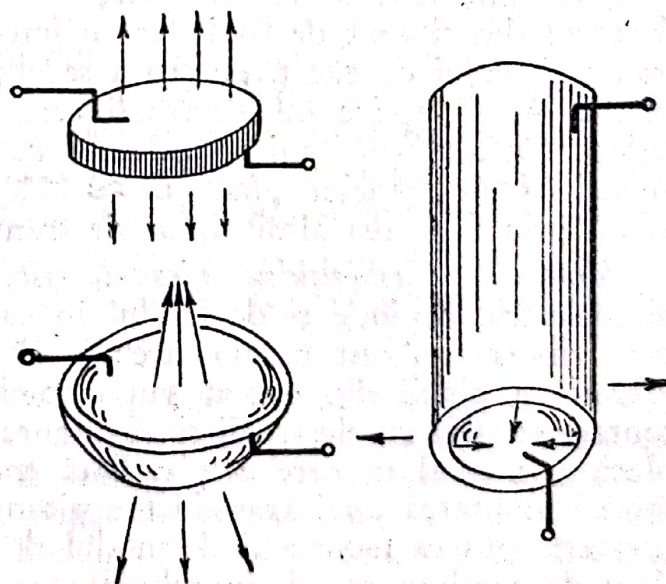


Fig. 2.10. Transductoare ceramice de diferite forme.

Se constată că pentru o aceeași grosime a plăcii, se obțin frecvențe de rezonanță de valori foarte apropiate, în cazul vibrațiilor longitudinale ale cristalului de cuarț, de cele ale ceramicii din titanat de bariu.

Pentru generarea ultrasunetelor mai pot fi utilizate și transductoare de formă cilindrică, având frecvența de rezonanță corespunzătoare vibrațiilor radiale ale cilindrului. Avantajul unui asemenea emițător constă în dimensiunile relativ mici pe care le are atunci când trebuie să lucreze la frecvențe joase. Are însă dezavantajul unei lipse de directivitate în emisia energiei acustice, caracteristica sa de directivitate într-un plan perpendicular pe axa cilindrului fiind un cerc. Se poate totuși asigura o anumită directivitate și la un asemenea emițător, dacă se utilizează cilindrii ale căror suprafețe nu vibrează în aceeași fază. Aceste vibrații defazate ale suprafeței pot fi obținute printr-o plasare judicioasă a electrozilor pe suprafața laterală a cilindrului.

Cu ajutorul transductoarelor de titanat de bariu nu pot fi obținute ultrasunete de frecvențe prea ridicate, de ordinul celor produse prin folosirea unui transductor cu cuarț. Aceasta se datorește pierderilor mai mari care au loc în dielectric și dificultății de a modela plăcuțe de grosimi prea mici. În general, prin folosirea ceramicelor din titanat de bariu pot fi generate ultrasunete de la câteva zeci de kiloherți până la mai mulți megaherți.

Factorul de cuplaj electromecanic este superior în cazul transductorului ceramic față de cel cu cuarț. Ținând seama și de faptul că transductorul din titanat de bariu are o impedanță mai coborâtă decât cea a transductorului cu cuarț, pentru a se obține o aceeași putere radiată este necesar să se aplice pe electrozii ceramicii tensiuni excitatoare relativ reduse. Cu ajutorul unui transductor cu titanat de bariu pot fi obținute intensități ale undelor plane de $\approx 100 \text{ W/cm}^2$, valoare ce nu poate fi atinsă prin folosirea altor tipuri de transductoare piezoelectrice.

Montarea elementului piezoelectric. Eficacitatea unui transductor piezoelectric depinde și de modul în care se face montarea elementului care vibrează. Acest montaj trebuie să ofere condiții cât mai bune de vibrație a plăcii din cristal sau ceramică, trebuie să realizeze un bun contact electric cu electrozii și să asigure un contact cât mai perfect între placă și mediul în care este radiată energia acustică. Aceste deziderate fac ca montarea unui transductor piezoelectric să depindă de mediul în care este pus să lucreze și de modul de lucru al emițătorului (generarea de unde continue sau de impulsuri).

În gaze, datorită cuplajului foarte slab care există între transductor și mediul respectiv, este necesar ca cristalul să fie montat în așa fel încât

să se reducă la maximum amortizarea. În acest scop, montarea plăcii se poate face printr-o încastrare ușoară a plăcii sau prin fixarea acesteia în punctele nodale. Cu toate că această ultimă metodă este mai eficientă decât prima, totuși, datorită faptului că în special la frecvențe mari localizarea punctelor nodale pe suprafața plăcii se face cu mare greutate, se preferă în practică aplicarea primei metode. În acest caz, prinderea plăcii trebuie să fie suficient de puternică pentru a se asigura un contact electric perfect, însă prin aceasta nu trebuie introdusă o amortizare suplimentară a vibrațiilor plăcii.

În cazul mediilor lichide și solide, problema montajului este mai ușor de rezolvat, dată fiind existența unui cuplaj mai bun între transductor și mediu. În acest caz o față a plăcii se găsește în contact cu mediul în care este radiată energia acustică, iar fața posterioară este în contact cu aerul. Două moduri de montaj sînt arătate în fig. 2.11. Dacă mediul lichid este bun conducător de electricitate, cristalul se izolează obișnuit de mediu printr-o membrană fină de cauciuc, a cărei impedanță caracteristică este apropiată de cea a cristalului. În cazul unui mediu solid bun conducător de electricitate nu mai este necesar ca fața cristalului care vine în contact cu corpul rigid să fie metalizată, legătura electrică între electrozi făcîndu-se prin mediul însuși.

Dacă transductorul este destinat să emită impulsuri ultrasonice, suportul cristalului trebuie astfel realizat încît să asigure o amortizare ridicată a vibrațiilor produse de acesta.

2.3.2. Emițătorul magnetostrictiv. Se bazează pe efectul magnetostrictiv care constă din modificarea dimensiunilor unui corp feromagnetic sub acțiunea unui cîmp magnetic. Deformarea se referă atît la dimensiunile liniare ale corpului cît și la dimensiunile circulare sau la volumul corpului considerat. Modificarea lungimii corpului, produsă în direcția cîmpului aplicat, reprezintă efectul cel mai important (efect Joule). Fenomenul este reversibil, astfel încît atunci cînd o forță mecanică produce o deformare a corpului din material feromagnetic, ia naștere o

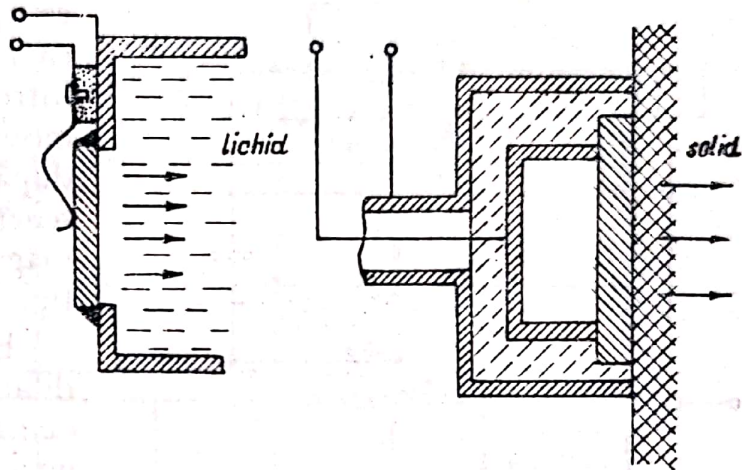


Fig. 2.11. Moduri de montare a transductoarelor piezoelectrice.

forță magnetică în direcția în care are loc deformarea (efectul Villari). Aceasta se poate explica pe baza teoriei domeniilor magnetizării. Într-un material policristalin, în absența câmpului magnetic extern, grupele de atomi sau domeniile sînt distribuite întîmplător. Dacă însă se aplică un câmp magnetic din exterior, domeniile se orientează în general după

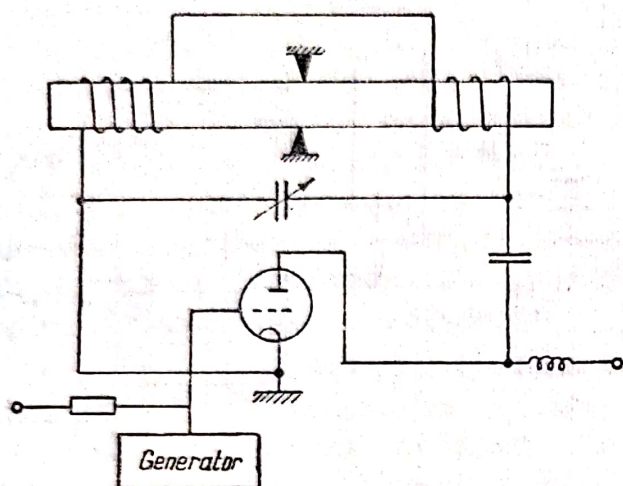


Fig. 2.12. Emițător magnetostrictiv.

direcția câmpului. Rearanjarea energiei în domenii magnetice are ca rezultat schimbări mecanice în întregul material. Apare astfel o modificare a lungimii materialului după direcția câmpului aplicat. O schemă bloc a unui emițător magnetostrictiv este arătată în fig. 2.12.

Efectul de contracție sau de dilatare laterală, ca și efectul Wiedemann, constînd din torsiunea unei bare supuse unui câmp magnetic longitudinal, sînt foarte slabe în comparație cu efectul Joule și trebuie considerate ca efecte se-

cundare. Dar chiar și modificarea lungimii barei este în general foarte redusă, fiind de ordinul a cîtorva microni, ea fiind independentă de sensul câmpului aplicat. Atît mărimea deformării cît și sensul în care aceasta se produce depind de natura materialului, de tratamentul suferit de acesta, de intensitatea câmpului magnetic aplicat și de temperatură.

Deformarea relativă λ a unei bare de lungime l este funcție de intensitatea câmpului magnetic conform relației

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = f(H). \quad (2.20)$$

Raportul $\Delta l/l$ este cunoscut sub denumirea de coeficient static al magnetostricțiunii. Coeficientul poate avea semn pozitiv, în care caz se produce o alungire a barei, sau poate avea semn negativ, în care caz se produce o scurtare a barei. În fig. 2.13 sînt indicate curbele de variație a coeficientului static al magnetostricțiunii în funcție de intensitatea câmpului magnetic pentru diferite materiale feromagnetice.

Din examinarea diagramei se constată următoarele:

— în cazul nichelului și al cobaltului călit, indiferent de intensitatea câmpului magnetic, efectul magnetostrictiv se traduce printr-o scurtare a

barei; în cazul unor aliaje ale cobaltului sau ale nichelului precum și al alferului, un aliaj format din 87% Fe și 13% Al, indiferent de intensitatea câmpului magnetic, efectul magnetostrictiv se manifestă printr-o alungire a barei; în fine, în cazul altor materiale ca fierul, cobaltul (turnat), sensul deformării depinde de intensitatea câmpului magnetic aplicat;

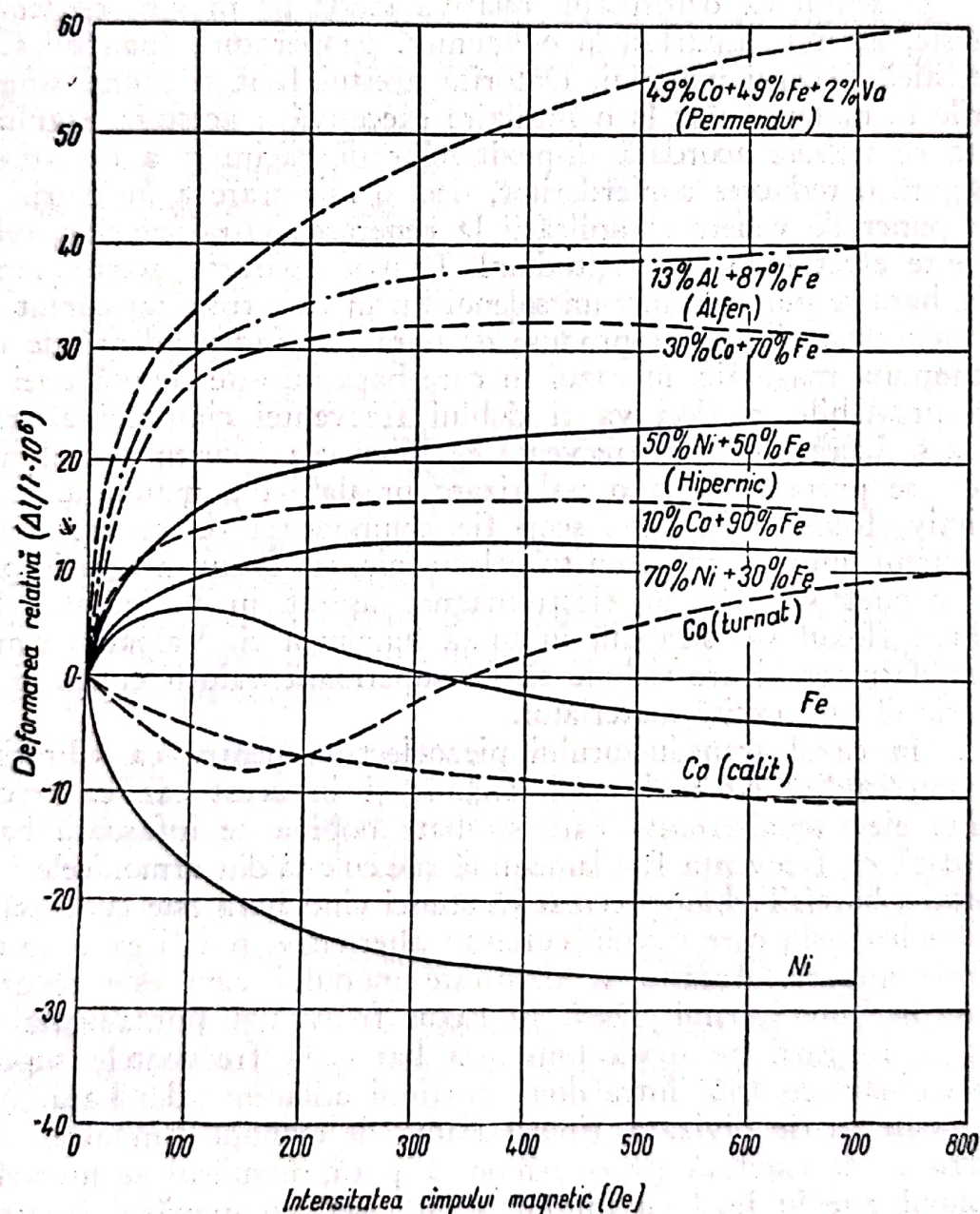


Fig. 2.13. Caracteristica magnetostrictivă la diferite materiale.

— curbele de variație a coeficientului static al magnetostricțiunii pornesc de la zero și tind către o asimptotă, valoarea corespunzătoare fiind denumită saturație magnetică λ_s . Rezultă deci existența unei anumite valori a intensității cîmpului magnetic, caracteristic fiecărui material în parte, pentru care se obține practic efectul maxim.

Temperatura exercită o influență puternică asupra efectului magnetostructiv, în sensul că deformația relativă scade pe măsură ce temperatura crește, efectul disparînd la o anumită temperatură (punctul Curie), caracteristică fiecărui material. Datorită acestui fapt și ținînd seama că pierderile în material duc la o încălzire excesivă a acestuia, rezultă importanța ce trebuie acordată dispozitivelor de răcire și a construcțiilor care asigură o reducere a pierderilor, deci o micșorare a încălzirii.

Din punct de vedere al aplicării la generarea ultrasunetelor, cel mai folosit este efectul Joule longitudinal. Pentru excitarea acestui mod de vibrație, bara se plasează într-un solenoid prin care trece un curent alternativ. Frecvența vibrațiilor produse de bară este independentă de orientarea cîmpului magnetic, în cazul în care bara nu este supusă unei magnetizări prealabile, și deci va fi dublul frecvenței cîmpului alternativ. Pentru a se lucra însă la o frecvență egală cu cea a curentului alternativ excitator, se procedează la o polarizare prealabilă a materialului magnetostrictiv, folosind în acest scop fie componenta de curent continuu a unui curent anodic dat de un tub electronic, fie fluxul magnetic produs de un magnet sau de un electromagnet așezat în vecinătatea barei, astfel încît fluxul s-o străbată în toată lungimea ei. Valoarea cîmpului continuu de magnetizare trebuie să fie superioară valorii cîmpului magnetic variabil care excită materialul.

Ca și în cazul transductorului piezoelectric, pentru ca vibrațiile să capete amplitudini cît mai mari, trebuie și în acest caz ca frecvența curentului electric alternativ care străbate bobina ce înfășoară bara să fie acordată cu frecvența fundamentală sau cu una din armonicele impare ale vibrației barei. Trebuie precizat că atunci cînd bara este cuprinsă simetric de bobina prin care circulă curentul alternativ, pot fi excitate numai armonicele impare. Aceasta se datorește modului cum este repartizată presiunea în lungul barei. Dacă în cazul frecvenței fundamentale presiunea este în fază pe toată lungimea barei, la frecvențele superioare faza se schimbă cu 180° între două porțiuni adiacente din bară, în care aceasta poate să fie divizată, ținînd seama de ordinul armonicei. Atunci cînd bara ar fi excitată pe o armonică pară, numărul segmentelor în care cîmpul este în fază cu presiunea este egal cu numărul segmentelor în care cîmpul este în opoziție de fază cu presiunea și, în consecință, bara nu mai poate vibra (fig. 2.14).

Frecvența de rezonanță a unei bare de lungime l se poate calcula cu relația

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.21)$$

în care E este modulul de elasticitate și ρ densitatea materialului din care este confecționată bara.

Din relația (2.21) se constată că frecvența proprie fundamentală depinde de lungimea barei sau a tubului, fiind invers proporțională cu aceasta. Folosindu-se bare scurte se pot obține frecvențe fundamentale de ordinul zecilor de kiloherti. Totuși, pentru a putea fi obținute frecvențe și mai ridicate, fără a se recurge la bare prea scurte, se utilizează o bară de formă specială, ce se obține dintr-un cilindru în care se practică la distanțe egale adâncituri având o aceeași lungime ca și părțile proeminente. Se transformă astfel cilindrul inițial într-o succesiune de cilindri mici, având alternativ razele r_1 și r_2 ($r_1 > r_2$), așa cum se arată în fig. 2.15. Frecvența proprie fundamentală a barei astfel prelucrate este egală cu cea a unei bare cilindrice simple, având lungimea de aproximativ zece ori mai mică decât lungimea uneia din părțile cilindrice.

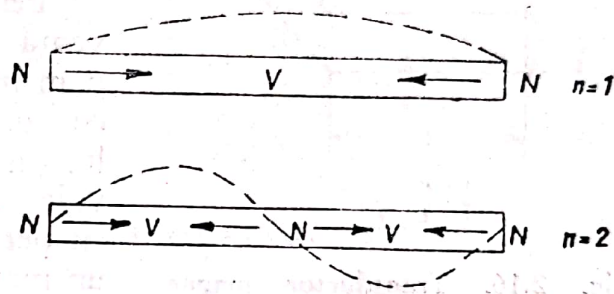


Fig. 2.14. Modul de vibrație a unei bare magnetostrictive.

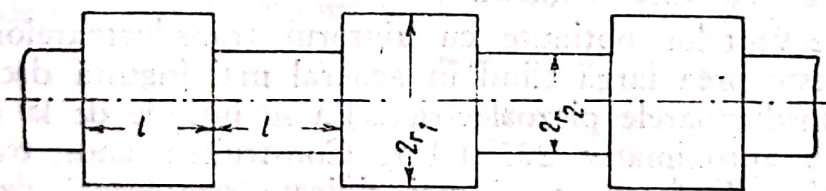


Fig. 2.15. Bară magnetostrictivă cu secțiuni variabile.

În cazul în care corpul ce vibrează este constituit din tole, având înălțimea h și lățimea l (fig. 2.16), frecvența fundamentală poate fi calculată cu relația

$$f_0 = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho(1+l/2h)}} \quad (2.22)$$

Din această relație se constată influența mare pe care o are înălțimea tolei asupra frecvenței fundamentale.

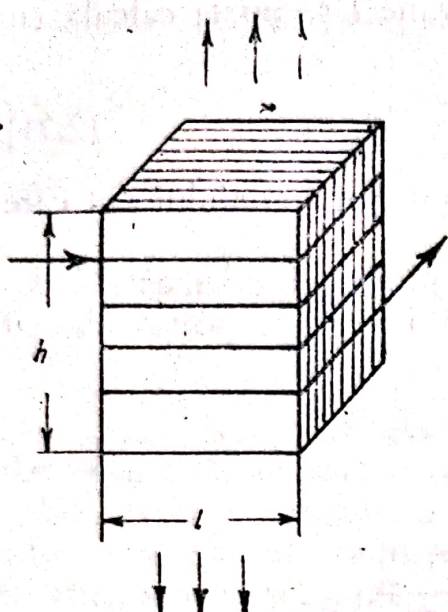


Fig. 2.16. Transductor magnetostrictiv constituit din tole.

Uneori se construiesc transductoare magnetostrictive de formă inelară. În acest caz, frecvența fundamentală de vibrație se poate calcula cu relația

$$f_0 = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.23)$$

în care r este raza medie a inelului.

Pentru a se obține ultrasunete de frecvență joasă, coborînd pînă la limita domeniului audibil, ar trebui folosite bare cu lungimi apreciabile. Pentru ca totuși lungimea barei să nu depășească o anumită valoare, se întrebuițează tuburi de nichel cu pereți subțiri, avînd în interior plumb, un material în care undele acustice se propagă cu o viteză relativ redusă, sau se îngreunează ambele capete ale barei cu

discuri groase de metal. Într-un asemenea caz, frecvența fundamentală este dată de relația

$$f_0 = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{E}{\pi l(M + m/3)}} \quad (2.24)$$

în care r este raza barei, l lungimea barei, iar m și M masa barei, respectiv aceea a unui disc terminal.

Gama frecvențelor obținute cu ajutorul transductoarelor magnetostrictive nu este prea largă fiind în general mai îngustă decît cea acoperită de transductoarele piezoelectrice. Ea se întinde de la cîtiva kiloherti pînă la aproximativ 200 KHz. Construirea unor transductoare magnetostrictive de frecvențe și mai ridicate este legată de dificultăți mecanice de neînlăturat, datorită faptului că, pe lîngă dimensiunile mici pe care trebuie să le aibă un astfel de emițător, mai intervine și problema pierderilor electrice prin histerezis și prin curenți Foucault. Acestea provoacă încălzirea și deci dilatarea barei, iar, ca urmare, proprietățile elastice și geometrice ale barei se modifică, ceea ce provoacă bineînțeles și o modificare a frecvenței proprii de vibrație.

Analog cu transductorul piezoelectric, și transductorul magnetostrictiv poate fi considerat ca o formă particulară de cuplaj între un sistem mecanic (bara sau tubul care vibrează) și un sistem electric (cir-

cuitul oscilant). În consecință, la analiza acestui transductor trebuie să se țină seama și de acest cuplaj, a cărei mărime depinde de proprietățile magnetice și mecanice ale elementului magnetostrictiv. Sistemul de ecuații ce caracterizează un asemenea transductor este

$$\begin{aligned} B &= \mu H + d_0 T \\ S &= d_0 H + s T \end{aligned} \quad (2.25)$$

în care B este inducția magnetică, H câmpul magnetic, μ permeabilitatea magnetică a materialului, d_0 constanta magnetostrictivă.

Eficacitatea unui transductor magnetostrictiv poate fi exprimată prin factorul de cuplaj magneto-mecanic, definit ca raportul dintre energia mecanică produsă și energia magnetică totală furnizată sistemului. Luând cazul unei bare de secțiune A și lungime l :

— energia mecanică rezultată sub formă potențială într-un element de lungime Δl este

$$\Delta W_{mec} = \frac{1}{2} F S \Delta l;$$

— energia magnetică furnizată unui element de bară de aceeași lungime Δl este

$$\Delta W_{mag} = \frac{1}{2} A B H \Delta l$$

iar factorul de cuplaj magneto-mecanic, conform definiției, este

$$k^2 = \frac{\Delta W_{mec}}{\Delta W_{mag}} = \frac{F S}{A \mu H^2} \quad (2.26)$$

deoarece $B = \mu H$. Pe de altă parte, din relația a doua a sistemului (2.25) pentru $S = 0$, bară încastrată, și apoi pentru $H = 0$, bară supusă numai la tracțiune, se obțin succesiv

$$H = T \frac{s}{d_0} = \frac{F s}{A d_0} \quad \text{și} \quad S = s T = s \frac{F}{A}.$$

Înlocuind în (2.25) pe H și S cu expresiile găsite mai sus, rezultă pentru factorul de cuplaj

$$k^2 = \frac{d_0^2}{s \mu} \quad (2.27)$$

o expresie analogă cu (2.18), corespunzătoare factorului de cuplaj la transductorul piezoelectric.

Se constată că valoarea factorului de cuplaj magneto-mecanic este cu atât mai ridicată cu cât valoarea constantei magnetostrictive ce caracterizează materialul din punctul de vedere al acestui efect este mai mare, și cu cât permeabilitatea și rigiditatea sînt mai scăzute.

Materiale magnetostrictive. Dintre toate materialele feromagnetice la care se întâlnește efectul magnetostrictiv, numai o mică parte își găsesc utilizarea în practică, la confecționarea emițătoarelor ultrasonice. Aceasta se datorește, pe de o parte faptului că unele dintre aceste materiale au slabe proprietăți magnetostrictive, cum este fierul, și pe de altă parte faptului că cu tot efectul magnetostrictiv pronunțat pe care-l prezintă, costul materialului este foarte ridicat, cum este cazul cobaltului.

Un material aplicat pe scară largă este nichelul, utilizat atât în stare pură, în care caz prezintă o forță coercitivă mică și o remanență magnetică redusă, cât și aliat cu alte metale în special cu fierul și cobaltul. Un aliaj de nichel cu 4,40% cobalt are cea mai mare valoare a coeficientului magneto-mecanic, egal cu 340%. La nichelul pur, punctul Curie este destul de coborît, așa încît utilizarea sa în această formă la transductoarele destinate să lucreze în special la temperaturi înalte nu este indicată. Se preferă în această situație aliajele sale.

În cazul aliajelor fier-nichel, coeficientul static al magnetostricțiunii depinde atât ca valoare cât și ca semn de procentul de nichel pe care-l conține aliajul. Astfel, pînă la 85% Ni materialul suferă o alungire sub acțiunea cîmpului magnetic, în timp ce la un procent mai mare de nichel, coeficientul static al magnetostricțiunii schimbă de semn, materialul suferind o scurtare pe timpul acțiunii cîmpului magnetic. O valoare maximă a coeficientului static al magnetostricțiunii se obține cu un aliaj ce conține în jur de 45% Ni. Asemenea aliaje au rezistențe specifice ridicate, pierderi histerezis scăzute și permeabilitate mare.

Materialul care oferă cea mai mare valoare a coeficientului static, corespunzător saturației magnetice, este un aliaj necălit conținînd 70% Co și 30% Fe. La acest material $\lambda_s = 130 \cdot 10^{-6}$. Mai des utilizat este permen-durul, tot un aliaj de cobalt și fier conținînd 49% Co, 49% Fe și 2% Va.

Caracteristicile cîtorva materiale feromagnetice care sînt importante de cunoscut la construirea unui transductor electromecanic, sînt redată în tabela 2.3.

Tabela 2.3

Materialul	ρ kg/m ³	E N/m ²	$\lambda_s = \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_s$	μ/μ_0 (optim)	k %	Punct Curie °C
Nichel	$8,8 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$-40 \cdot 10^{-6}$	40	15—31	358
Alfer	$6,7 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$40 \cdot 10^{-6}$	190	25—30	500
Permaloi	$8,2 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$30 \cdot 10^{-6}$	—	12	440
Permendur	$8,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$70 \cdot 10^{-6}$	50	25—31	980

O deficiență comună tuturor materialelor magnetostrictive metalice specifice mai sus este de a favoriza pierderile prin histerezis și prin curenți Foucault. În scopul micșorării pierderilor cauzate de curenții turbionari, se practică o tăietură în lungul tubului care constituie elementul magnetostrictiv, sau acesta se confecționează din table subțiri, izolate între ele, prinse sau sudate sub formă de pachet. Cunoșcând că grosimea lamelor influențează mărimea pierderilor la diferite frecvențe, pentru transductorii care lucrează la frecvențe de ~ 30 kHz se iau table având grosimi de 0,3—0,4 mm; pentru transductorii destinați să lucreze la frecvențe mai ridicate, grosimile tablelor sînt de ordinul a 0,10—0,15 mm. Dacă se utilizează tole de nichel, izolantul dintre ele poate fi constituit dintr-o peliculă fină de carbonat care se formează atunci cînd tabla este încălzită în aer la o temperatură de 800°C și este lăsată apoi să se răcească încet. Dacă se folosesc tole de permendur, cum acestea nu formează o peliculă izolantă prin încălzire, este necesar să se prevadă interpunerea între tole a unui strat izolant. În acest scop se întind între tablele de permendur foi de mică, de cîteva sutimi de milimetri grosime. La transductorii destinați să lucreze în condiții termice mai ușoare, se poate înlocui izolamentul de mică cu o peliculă izolatoare fixată prin pulverizare cu ajutorul unui clei pe bază de rășini sintetice.

În ultimii ani, pe lîngă materialele metalice, la confecționarea transductorilor magnetostrictivi se folosesc tot mai mult feritele, materiale ceramice cu bune proprietăți magnetice. Ele prezintă de asemenea o rezistență mecanică mare, iar pierderile prin curenți turbionari sînt practice nule. În felul acesta, ele pot fi utilizate sub forma unor miezuri monolite.

Proprietățile magnetice ale feritelor sînt determinate în primul rînd de compoziția lor chimică, însă depind și de anumiți factori tehnologici care au intervenit pe timpul preparării acestor materiale. Caracteristicile unor ferite, indicate de I. P. Goleamina sînt date în tabela 2.4. Se constată că la toate feritele coeficientul de saturație magnetică (λ_s) este în toate cazurile negativ, materialul suferind comprimări sub acțiunea cîmpului magnetic, iar ca valoare este comparabilă cu cea corespunzătoare

toare materialelor feromagnetice. Prin folosirea feritelor se pot obține transductori care să aibă un coeficient de cuplaj magnetomecanic destul de ridicat, comparabil cu cel corespunzător celor mai superioare materiale feromagnetice. Punctul Curie este de asemenea destul de ridicat atingând valori care depășesc 500°C.

Tabela 2.4

Materialul	Compoziția chimică	ρ kg/m ³	E N/m ²	$\lambda_s = \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_s$	μ/μ_0 (optim)	k %
Ferită 21	NiOFe ₂ O ₃	5,20·10 ³	1,75·10 ¹¹	-26·10 ⁻⁶	44	21
Ferită 38	NiO _{0,5} ZnO _{0,5} Fe ₂ O ₃	5,27·10 ³	1,75·10 ¹¹	-9·10 ⁻⁶	90	14
Ferită 41	NiO _{0,99} COO _{0,01} Fe ₂ O ₃	5,21·10 ³	1,75·10 ¹¹	-26·10 ⁻⁶	19	24
Ferită 42	NiO _{0,98} COO _{0,02} Fe ₂ O ₃	5,21·10 ³		-26·10 ⁻⁶	22	33

Pentru a se pune în evidență modul de variație a proprietăților magnetostriuctive ale unei ferite atunci când se modifică compoziția sa chimică, sînt indicate în tabela 2.5 valorile diferiților parametri mecanici și magnetici la o ferită la care conținutul de ferită de zinc în soluția solidă crește.

Tabela 2.5

NiOFe ₂ O ₃ molar %	ZnOFe ₂ O ₃ molar %	ρ kg/m ³	E N/m ²	$\lambda_s = \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_s$	μ/μ_0	δ	k %
100	0	5,20·10 ³	1,75·10 ¹¹	-26·10 ⁻⁶	44	0,34	21
90	10	5,21·10 ³	1,75·10 ¹¹	-23·10 ⁻⁶	49	0,32	19
80	20	5,20·10 ³	1,78·10 ¹¹	-20·10 ⁻⁶	117	0,33	17
70	30	5,23·10 ³	1,82·10 ¹¹	-16·10 ⁻⁶	160	0,34	16
60	40	5,25·10 ³	1,84·10 ¹¹	-13·10 ⁻⁶	221	0,34	15
50	50	5,27·10 ³	1,85·10 ¹¹	-9·10 ⁻⁶	330	0,35	14

Din examinarea datelor din tabelă se constată că, pe măsură ce procentul de ferită de zinc crește, coeficientul de saturație magnetică (λ_s) și factorul de cuplaj magnetomecanic (k) descresc. Cum la transductorii care funcționează ca emițătoare de ultrasunete acești doi parametri dețin un rol important, rezultă că este avantajos să fie întrebuintate ferite cu un conținut mic de zinc. Factorul de pierderi δ rămîne practic același, fiind independent de compoziția chimică a feritei.

Ferita fiind un material fragil, domeniul de aplicare la generarea vibrațiilor ultrasonice este deocamdată limitat la emițătoare de intensi-

tăți mici. Cu toate acestea se caută să se producă ferite cu porozitate scăzută, care le fac mai puțin fragile, putînd fi astfel folosite și la construcția emițătoarelor ultrasonice de puteri mari.

2.3.3. Emițătorul electromagnetic. După modelul emițătoarelor electromagnetice folosite în domeniul frecvențelor audibile (difuzoare, căști telefonice), s-au construit și emițătoare care au posibilitatea să emită unde acustice avînd frecvența superioară limitei de audibilitate. Ultrasonetele generate însă de asemenea emițătoare sînt în general de frecvență coborîtă. Emițătoarele din această categorie se bazează pe interacțiunea cîmpului magnetic și curentului electric. Se utilizează în prezent două tipuri de emițătoare: unul cu bobină mobilă și altul cu bară de fier vibrantă.

Emițătorul ultrasonic cu bobină mobilă este o variantă a difuzorului electrodinamic, cu diferența că membrana de hîrtie a acestuia din urmă este înlocuită cu o membrană metalică circulară sau cu un cilindru me-

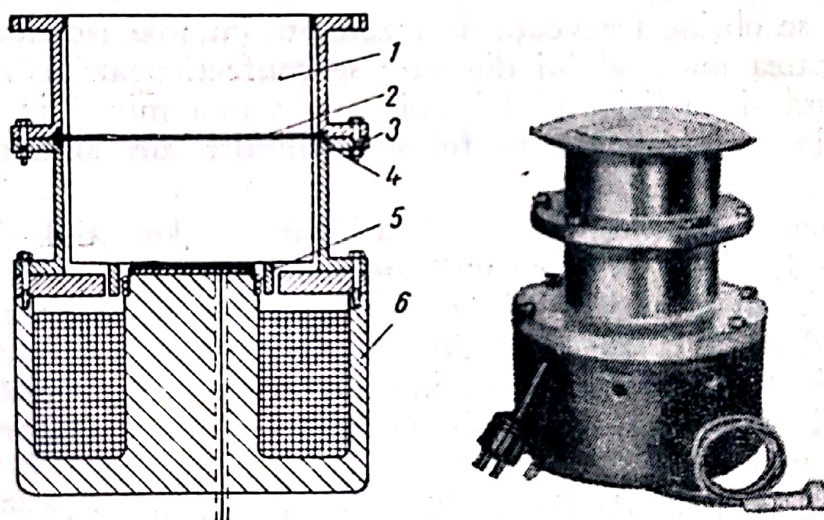


Fig. 2.17. Emițător electromagnetic:

1 — cilindru vibrator; 2 — inel; 3 — suportul vibratorului; 4 — garnitură de cauciuc; 5 — inel de comandă; 6 — magnet.

talic plin, avînd o frecvență de rezonanță ridicată. Acestea sînt montate rigid la bobina mobilă.

Mai frecvent întîlnit în practică este emițătorul cu cilindru metalic plin, al cărui diametru este comparabil cu lungimea sa și căruia i se poate imprima vibrații longitudinale în lungul axei sale (fig. 2.17). Cilin-

drul se fixează cu ajutorul unui inel plat (2), strunjit din piesa însăși la jumătatea ei. Inelul este prins într-un suport (3) prin intermediul unor garnituri de cauciuc (4). La partea de jos a cilindrului există un inel de comandă (5) care intră în întrefierul unui magnet permanent sau al unui electromagnet (6). Aceasta constituie bobina mobilă. Bobina de excitație a electromagnetului este înfășurată în jurul terminației miezului central al acestuia și prin spire circulă un curent alternativ, având frecvența egală cu frecvența de rezonanță a cilindrului care vibrează. Curentul indus în inelul de comandă interacționează cu câmpul magnetic radial și ca urmare ia naștere o forță mecanică ce pune în mișcare cilindrul.

Frecvența de rezonanță a unui astfel de emițător poate fi calculată cu ajutorul relației indicată de Rayleigh

$$f_0 = \frac{(1-\sigma^2)\pi R^2}{4l^2} \cdot \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.28)$$

în care R este raza cilindrului, l lungimea cilindrului, iar σ coeficientul lui Poisson.

Pentru a se obține frecvențe de rezonanță cât mai ridicate, este necesar ca densitatea materialului din care se confecționează cilindrul să fie cât mai redusă și coeficientul lui Poisson cât mai mic. Din acest motiv la construcția emițătoarelor se folosesc cilindri din aluminiu sau din aliaje ușoare.

Un asemenea emițător poate fi utilizat în domeniul de frecvențe cuprins între 15 și 20 kHz, cu un randament de $\approx 30\%$, cu toate că în cazuri speciale au putut fi obținute și ultrasunete de frecvențe mai ridicate ajungând pînă la 75 kHz. Atunci cînd emițătorul este utilizat să genereze unde ultrasonice în gaze, impedanța de radiație este scăzută și, în consecință, și puterea acustică a unui astfel de emițător lucrînd în gaze nu este mare.

Emițătorul cu bară de fier mobilă este o variantă a căștii telefonice, la care placa metalică este înlocuită cu o bară de fier pusă în vibrație de câmpul magnetic produs de un electromagnet, prin înfășurarea căruia circulă un curent alternativ de înaltă frecvență. Un asemenea dispozitiv poate produce ultrasunete de intensități relativ ridicate, însă de frecvențe în general inferioare valorii de 20 kHz. Se folosește în special în aplicațiile în care mediul de propagare a ultrasunetului este un lichid. Prin faptul că electromagnetul vibratorului poate fi perfect etanșat, făcînd să fie izolat complet de mediul înconjurător, asemenea emițătoare pot fi utilizate în lichide care fierb sau care sînt ușor agresive, de exemplu soluții slabe de acizi sau baze.

În categoria emițătoarelor electromagnetice mai pot fi înglobate și emițătoarele de impulsuri. Un asemenea dispozitiv a fost conceput și construit de W. Eisenmenger (fig. 2.18), servind la producerea de unde de șoc într-un mediu lichid. Emițătorul se compune dintr-un solenoid plat (1), în fața căruia se găsește o membrană de cupru (2) separată de

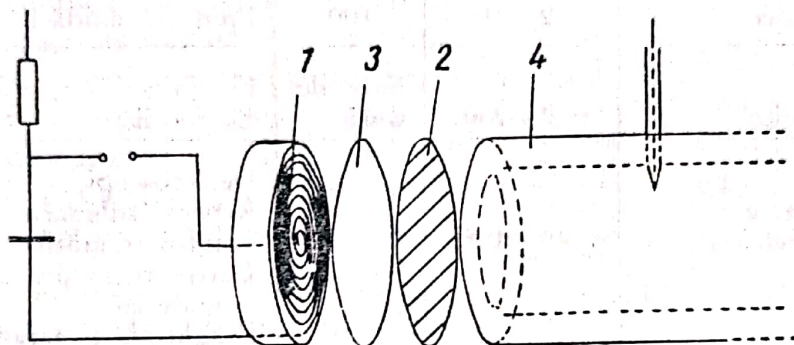


Fig. 2.18. Emițător electromagnetic de impulsuri:

1 — solenoid plat; 2 — membrană de cupru; 3 — izolator; 4 — tub umplut cu lichid.

solenoid prin intermediul unei foițe subțiri din material plastic avînd grosimea de 0,2 mm (3). Membrana închide în același timp un tub (4) cu diametrul interior de 50 mm, conținînd lichidul în care sînt radiate undele de șoc. O descărcare de curent prin solenoid face să se inducă în membrana de cupru curenți turbionari puternici. Cîmpurile magnetice rezultante dau naștere unor forțe de repulsie foarte intense între solenoidul plat și membrană, făcînd ca aceasta să lovească cu putere coloana de lichid cu care vine în contact. Din măsurările efectuate, s-a constatat că un curent de 4 000 A trece printr-un solenoid alcătuit din 50 de spire atunci cînd un condensator cu o capacitate de $0,8 \mu\text{F}$ încărcat la 20 kV este descărcat prin acesta. Durata impulsului de curent este numai de $\mu 3,5$ s, iar presiunea exercitată de membrană este de 200 atm. Cu un condensator de $8 \mu\text{F}$ și o tensiune de încărcare de 12 kV s-au produs unde de șoc cu o presiune de vîrf superioară valorii de 700 atm.

Caracteristicile tehnice și utilizările diferitelor tipuri de emițătoare de ultrasunete sînt indicate în tabela 2.6.

Din această tabelă se observă că emițătoarele care acoperă aproape întregul domeniu al ultrasunetelor, avînd posibilitatea să genereze și hipersunete, sînt emițătoarele piezoelectrice. Acestea pot fi realizate de puteri variate în raport cu scopul utilizării undelor acustice în procese de

Tabela 2.6

Tipul emițătorului		Caracteristici tehnice		Utilizări
		Domeniul de frecvențe (kHz)	Puterea (W)	
Mecanice	Fluier ultrasonice	2 – 100	100	Cercetări fiziologice (în aer). Emulsii, oxidări
	Sirene ultrasonice	0,2 – 250	Sute de wați	Precipitări Suspensii
Electromecanice	Emițătoare piezoelectrice	40 – 10 ⁶	—	Defectoscopie Reperaj submarin Emulsii. Curățire materiale Cercetări asupra structurii materiei Diagnostic și terapeutică
	Emițătoare magnetostrictive	15 – 200	—	Prelucrări de piese Sudare. Reperaj submarin Curățire materiale Defectoscopie beton Tratamente metale
	Emițătoare electromagnetice	15 – 20	—	Emulsii Spălare fibre textile

măsurare sau în procese de prelucrarea materialului. Celelalte tipuri de emițătoare generează ultrasunete într-o bandă limitată de frecvențe, astfel încât ele sînt utilizate în anumite cazuri particulare.

2.3.4. Emițătoare de hipersunete. Cercetarea structurii materiei cu ajutorul undelor acustice implică producerea de ultrasunete de frecvențe foarte ridicate și a hipersunetelor. Transductoarele cu cristale de cuarț obișnuite nu pot fi utilizate în acest scop din cauză că implică grosimi extrem de mici ale plăcii, care poate fi distrusă cu ușurință, chiar atunci cînd se lucrează pe armonici ale frecvenței de rezonanță. Din acest motiv se folosesc emițătoare piezoelectrice cu montaje speciale, indicate de K. N. Baranski, pe de o parte și de H. E. Bömel și K. Dransfeld, pe de altă parte, cu ajutorul cărora au putut fi emise hipersunete în banda 1000—2500 MHz.

Folosind un alt tip de montaj pentru emițătorul piezoelectric, J. W. Stewart a reușit să obțină hipersunete cu frecvența de 10⁴ MHz,

radiind energia acustică în apă și în aluminiu. Emițătorul cuprinde o plăcuță de cuarț cu tăietură X, așezată la intrarea unei cavități cilindrice, ale cărei dimensiuni sînt astfel alese încît să rezoneze la frecvența dorită (fig. 2.19). Cavitătea rezonatoare în care se produce un cîmp electromagnetic pentru excitarea plăcuții de cuarț, este făcută din alamă și foi de aur și este închisă la partea sa superioară cu o foaie de argint A. Un șurub S este folosit pentru a varia mărimea interspațiului dintre această foaie și suprafața superioară a cristalului și prin aceasta cavitătea poate fi acor-dată pe frecvența de rezonanță dorită.

Placa de cristal este rezemată numai pe contur, care rămîne în afara acțiunii cîmpului electric. Datorită acestui fapt, în vibrație este pusă numai partea centrală a cristalului, în timp ce vibrațiile radiale care ar putea fi excitate sînt amortizate. În consecință, sînt generate numai unde longitudinale.

Datorită faptului că un asemenea emițător, lucrează la rezonanță, plăcuțele de cuarț sînt foarte subțiri. În plus, ele trebuie să aibă fețele perfect paralele. Astfel pentru generarea de ultrasunete cu o frecvență de 3 000 de MHz plăcuța de cuarț are o grosime de 100μ și un diametru de 10 mm, iar pentru generarea de ultrasunete de 10 000 de MHz grosimea cristalului este de numai 30μ , iar diametrul de 5 mm.

Randamentul unui emițător de hipersunete, definit ca raportul dintre energia electromagnetică folosită și energia ultrasonică emisă în apă, în cazul unei cavități proiectate pentru frecvența de 3 000 MHz este de aproximativ 10%. Această valoare poate fi mărită prin alegerea cît mai judicioasă a dimensiunilor cavității rezonatoare.

În ultimul timp se studiază un nou mijloc de generare a undelor hipersonice într-un mediu prin iradierea acestuia cu un fascicol luminos produs de laser. La aceasta s-a ajuns în urma constatării că un impuls de lumină coerentă provoacă în mediul material pe care îl traversează unde acustice de frecvențe ridicate. Pe cale experimentală s-a dovedit că acest efect se produce în aproape totalitatea mediilor materiale: aer, apă, solide cristaline sau amorf, ca și în țesuturi animale.

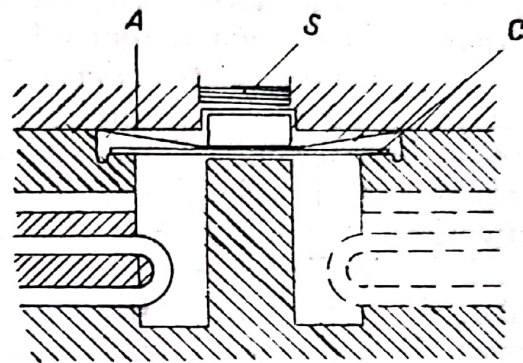


Fig. 2.19. Emițător de hipersunete:
C — plăcuță de cuarț; A — foaie de argint; S — șurub.

Mecanismul de producere pe această cale a undelor hipersonice nu este încă complet lămurit, însă se pare că s-ar datora mai multor cauze și anume:

- presiunii de radiație electromagnetică exercitată de o radiație laser asupra unei suprafețe a mediului;
- efectului termic, asociat încălzirii brusce a mediului, care absoarbe o parte din energia luminoasă a fasciculului laser;
- efectului electrostrictiv, bazat pe variația constantei dielectrice a mediului sub acțiunea luminii coerente;
- interacțiunii dintre fotoni și fononi, fononii de frecvențe foarte ridicate din interiorul mediilor fiind stimulați de sursa luminoasă de o intensitate extrem de mare, cum este laserul.

Prin iradierea mediului cu ajutorul unui laser avînd puterea de 50 MW, este posibil a produce un impuls acustic avînd o putere instantanee de ordinul kilowaților. Utilizarea unui laser cu rubin, căruia îi corespunde o frecvență de $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz, face posibilă generarea în apă de hipersunete avînd frecvența în jur de 4 330 MHz.

2.4. ADAPTAREA EMITĂTORULUI LA MEDIU

S-a arătat la § 1.5 că transferul de energie acustică dintr-un mediu în alt mediu, caracterizat prin coeficientul de transmisie acustică, τ depinde de impedanțele caracteristice ale mediilor în contact, admițînd că propagarea undelor longitudinale se face sub incidență normală. În consecință, pentru ca energia produsă de un emițător acustic să fie transferată într-o cantitate cît mai mare în mediul în care este necesar să se propage această energie, trebuie realizată o cît mai bună adaptare între emițător și mediu, cu alte cuvinte impedanțele caracteristice ale acestora să fie cît mai apropiate ca valoare.

Cum radiația energiei ultrasonice se poate face atît în gaze, cît și în medii lichide și solide este necesar ca studiul problemei adaptării sursei la mediu să fie făcută ținînd seama de aceste posibilități.

Datorită tocmai unei diferențe prea mari între valorile impedanțelor caracteristice ale unui cristal sau unei bare metalice pe de o parte, și valoarea impedanței caracteristice a aerului, pe de altă parte, transducătoarele piezoelectrice și cele magnetostrictive nu sînt folosite pentru a emite ultrasunete în aer. Într-un asemenea mediu energia ultrasonică necesară este produsă de către fluieri sau sirene. Dar și la utilizarea unor astfel de emițătoare trebuie să existe preocuparea realizării unei adaptări a impedanțelor, căci numai în felul acesta se pot obține puteri radiate suficient de mari. Adaptarea emițătorului la mediu se realizează cu ajutorul pîlنيilor acustice de formă conică, dar mai ales exponențială.

Impedanța acustică corespunzătoare unei secțiuni aflate la distanța x de gâtul unei pîlnii exponențiale, considerate practic infinită, la care diametrul secțiunii gurii este mult mai mare decît lungimea de undă a ultrasunetului produs, este dată de relația

$$Z_x = \frac{\rho_0 c}{S_x} \left(\sqrt{1 - \frac{m^2}{4k^2}} + j \frac{m}{2k} \right) \quad (2.29)$$

unde m este o constantă care caracterizează modul exponențial de creștere a secțiunii, iar S_x secțiunea pîlniei la distanța x de gât.

În relația (2.29) primul termen, real, reprezintă rezistența acustică, în timp ce al doilea termen, imaginar, reprezintă reactanța acustică. Cele două mărimi depind de constanta pîlniei exponențiale m și de frecvență prin intermediul lui k ($k = 2\pi/\lambda$). Cu cît frecvența este mai mare, cu atît rezistența acustică devine mai mare și reactanța acustică mai mică, permițîndu-se să se obțină puteri de radiație tot mai mari. Rezultă deci că o pîlnie exponențială este mai eficace în domeniul ultrasunetelor decît în domeniul audibil. Aceasta este tocmai motivul pentru care toate sirenele ultrasonice, atît cele statice, cît și cele dinamice, sînt prevăzute cu pîlnii acustice.

În cazul cînd este necesar să se transmită energie acustică de la un transductor electromecanic la un corp solid, stratul de aer care ar exista între cele două medii solide, avînd chiar o grosime foarte redusă, de ordinul micronilor, poate împiedeca transferul de energie. Din acest motiv este necesar să se asigure un cuplaj cît mai bun între emițător și mediu, adică între transductor și corpul solid în care se face radiația energiei acustice. Acest lucru se poate realiza prin:

- cufundarea emițătorului și corpului solid într-o masă de lichid care servește ca strat intermediar de propagare între transductor și mediul solid în care trebuie să se propage undele ultrasonice;

- folosirea de transductoare speciale cu pernițe umplute cu lichid sau cu vîină de lichid;

- interpunerea unui strat subțire de lichid sau constituit dintr-o pastă între suprafața emițătorului și suprafața corpului solid.

Primele două procedee asigură un transfer constant al energiei acustice, mai ales dacă se iau măsuri pentru evitarea formării undelor staționare, însă provoacă o atenuare considerabilă a intensității acustice. Din acest motiv, aceste procedee se folosesc numai în măsurări cu ultrasunete sau în defectoscopia ultrasonică cu emisie continuă, cînd nu sînt necesare intensități acustice mari. În toate celelalte cazuri se preferă să se aplice al treilea procedeu. În acest caz, așa după cum rezultă din expresia (1.64) a coeficientului de transmisie, eficacitatea cuplajului depinde de:

- grosimea stratului intermediar de cuplaj;

— impedanțele caracteristice ale mediilor solide precum și a stratului intermediar;

— direcția de propagare a undelor incidente.

În plus, eficacitatea cuplajului mai poate să varieze în raport cu starea suprafețelor care delimitează mediile solide și cu gradul de stabilitate a parametrilor fizici corespunzători lichidului care constituie stratul de cuplare.

Admițând că valorile impedanțelor caracteristice ale mediilor solide 1 și 3, care reprezintă elementul de radiație și corpul solid în care trebuie să pătrundă undele acustice, sînt foarte apropiate considerîndu-le egale și presupunînd propagarea undelor longitudinale sub incidență normală, expresia (1.64) se simplifică putîndu-se scrie

$$\tau = \frac{1}{\cos^2 k_2 l + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho c} + \frac{\rho c}{\rho_2 c_2} \right)^2 \sin^2 k_2 l} \quad (2.30)$$

Notînd $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = m$, expresia (2.30) devine

$$\tau = \frac{m^2}{m^2 + \frac{1}{4} (1 - m^2) \sin^2 k_2 l} \quad (2.31)$$

Prin intermediul funcției $\sin k_2 l$, coeficientul de transmisie acustică depinde de grosimea stratului intermediar, această variație fiind reprezentată, pentru diferite valori ale raportului m , în diagrama din fig. 2.20.

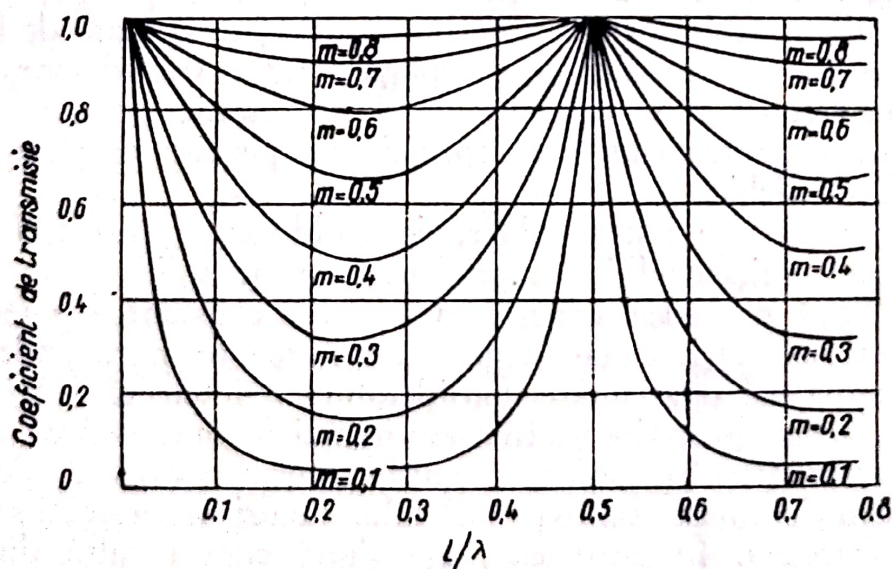


Fig. 2.20. Dependența coeficientului de transmisie de grosimea stratului dintre elementul de radiație și mediu.

Din această diagramă se vede că se poate realiza un transfer maxim de energie acustică atunci cînd se întrebuițează straturi rezonante avînd grosimi egale cu un număr întreg de jumătăți de lungimi de undă.

Dacă se utilizează straturi cu o grosime egală cu $\lambda/2$, transferul de energie este cu atît mai bun cu cît impedanța caracteristică a lichidului de cuplaj este mai mare, cu cît acesta este mai vîscos, cu cît asperitățile suprafețelor solide în contact sînt mai mici și cu cît durata impulsului ultrasonic este mai mare iar frecvența este mai ridicată.

În ceea ce privește caracteristicile fizice ale lichidului folosit ca mediu de cuplaj, acestea trebuie să rămînă invariabile pe timpul măsurărilor. Astfel, dacă pe durata lucrului temperatura crește, mediul intermediar trebuie să rămînă în aceeași stare lichidă, cu o aceeași vîscozitate, în întreaga bandă de temperatură pe care o poate atinge mediul în acest interval de timp. Lichidul de cuplaj trebuie să adere bine la suprafața corpurilor solide și nu trebuie să aibă o acțiune corozivă.

În mod obișnuit se folosesc ca medii de cuplaj uleiuri, valvolină, glicerină sau combinații de glicerină cu apă. În cazul încercării nedestructive a betoanelor, datorită suprafeței poroase și rugoase a acestora, este indicat să se folosească drept mediu de cuplaj un fluid cu o vîscozitate mai mare, cum ar fi vaselina; dar rezultatele cele mai bune la betoanele rugoase se obțin în cazul folosirii plastilinei. Dacă temperatura corpurilor devine mai mare decît temperatura camerei, se recomandă utilizarea uleiurilor consistente sau combinațiilor acestora, acestea fiind indicate și cînd suprafața corpului de examinat este slab finisată.

Atunci cînd la măsurări se utilizează unde transversale, mediul de cuplare trebuie să fie capabil să suporte eforturi tăietoare. Din acest motiv este indicat să se folosească în asemenea situație o substanță adezivă, cum ar fi fenil-salicilat sau balsamul de Canada, care asigură o legătură solidă, însă care în același timp poate fi îndepărtată cu ușurință de pe suprafața transductorului și a corpului solid, fără a le deteriora.

Datorită faptului că în practică este dificil a se asigura o grosime precisă a stratului de cuplare, egală cu $\lambda/2$ sau cu un număr întreg de $\lambda/2$, în acest spațiu vor interveni reflexii multiple, creîndu-se unde staționare care vor influența desigur transferul de energie. Pentru a se înlătura reflexiile din cadrul stratului cuplant, au fost realizate transductoare nerefectante. La acestea, suprafața ce radiază energia acustică este acoperită cu un strat subțire dintr-un material care are proprietatea de a absorbi cantitatea de energie ultrasonică ce s-ar întoarce la emițător în urma reflexiei de suprafața corpului rigid. Se utilizează în acest scop un

strat din cauciuc preparat special, lipit de suprafața de radiație a transductorului. Prin această transformare, însă, sensibilitatea emițătorului descrește și această scădere este cu atât mai pronunțată cu cât frecvența ultrasunetului este mai mare.

2.5. CONCENTRATOARE DE ENERGIE ULTRASONICĂ

Intensitatea acustică obținută cu un emițător ultrasonic are o valoare limitată, determinată de un număr de factori, printre care un loc important îl deține tipul elementului care este pus în vibrație și care radiază energia acustică în mediul considerat. Astfel, în cazul emițătoarelor piezoelectrice care folosesc plăcuțe de cuarț, atunci când se iau măsuri pentru a preveni producerea cavitației în lichidul în care are loc emisia, pot fi obținute intensități acustice pînă la aproximativ 60 W/cm^2 . În anumite condiții favorabile au putut fi realizate și intensități de ordinul a 300 W/cm^2 la frecvența de $1,5 \text{ MHz}$. Această limitare a intensității este determinată de rezistența mecanică a cuarțului și de faptul că este imposibil în practică a se elimina descărcarea electrică de la marginea plăcii de cuarț atunci când pe electrozii acesteia se aplică o tensiune înaltă.

Dacă se folosesc plăci din titanat de bariu, intensitățile acustice maxime care pot fi obținute cu asemenea emițătoare sînt și mai scăzute, nedeșășind în mod obișnuit 5 W/cm^2 , iar prin utilizarea unei răcirii suplimentare se poate atinge valoarea de 15 W/cm^2 . De data aceasta limitarea este determinată de încălzirea puternică a plăcii ceramice care vibrează, datorită pierderilor mecanice și în dielectric, temperatura la care ajunge placa putînd depăși punctul Curie.

De asemenea, și emițătoarele magnetostrictive nu sînt în măsură să producă ultrasunete de intensități prea mari. Astfel, din cauza pierderilor prin fricțiune și a pierderilor prin curenți Foucault, intensitatea acustică a undelor ultrasonice emise este limitată la transductoarele de nichel la $7\text{—}16 \text{ W/cm}^2$, iar la cele pe bază de ferite la $3\text{—}6 \text{ W/cm}^2$.

În multe aplicații însă este necesar să se realizeze într-un volum relativ redus concentrații mari de energie, intensitatea acustică trebuind să depășească cu mult valorile maxime indicate mai sus. Datorită faptului că undele ultrasonice, în special cele de frecvențe mai ridicate, au o comportare analogă cu undele luminoase, s-a recurs în acest scop la crearea de dispozitive care să permită concentrarea energiei acustice, dispozitive similare cu acelea ce asigură concentrarea energiei luminoase. Au fost create astfel reflectorii concavi și lentilele acustice ale căror dimensiuni sînt

superioare lungimilor de undă. Ecuațiile corespunzătoare din optică se aplică și în cazul sistemelor concentratoare de energie acustică, cu observația că în acest ultim caz fenomenul de difracție este mult mai pronunțat, din cauza lungimilor de undă relativ mari.

Ambele sisteme concentratoare, reflectorii și lentilele, permit ca energia acustică să fie concentrată într-un volum mic, prin transformarea unui fascicul de unde plane în unde sferice care converg într-un focar. Admițând că fasciculul incident de unde plane cu lungimea de undă λ , are secțiunea circulară de rază R și se propagă de-a lungul axei principale a reflectorului sau lentilei, energia converge în focarul geometric, iar intensitatea acustică într-un punct din planul care trece prin acest focar este dată de relația

$$I = A(\pi R^2)^2 \left[\frac{2J_1(z)}{z} \right]^2 \quad (2.32)$$

în care J_1 este funcția Bessel de ordinul întâi a argumentului

$$z = \frac{2\pi r R}{f\lambda}$$

unde r este distanța de la axa principală Z și f este distanța focală a reflectorului sau lentilei. A este un factor care depinde de intensitatea acustică a unde plane incidente

$$A = I_i / (f\lambda)^2.$$

Valorile maxime și minime ale intensității acustice intervin atunci când derivata funcției din expresia (2.32) se anulează, adică

$$\frac{d}{dz} \left[\frac{J_1(z)}{z} \right] = 0 = J_2(z) \quad (2.33)$$

în care J_2 este funcția Bessel de ordinul doi.

În particular, maximul de ordinul zero a intensității acustice intervine la $z=0$, în care caz $J_1(z)/z = 1/2$, iar

$$I_m = A(\pi R^2)^2. \quad (2.34)$$

Fluxul total de energie care străbate o secțiune circulară de rază r în planul XY este

$$\Phi = \int_0^r I \cdot 2\pi r dr = A\pi R^2 f^2 \lambda^2 [1 - J_0^2(z) - J_1^2(z)]. \quad (2.35)$$

Prin folosirea acestei relații se poate calcula raza r_0 a petei focale, limitată la o circumferință ce marchează primul minim al intensității acustice (fig. 2.21), anume

$$r_0 = 0,61 \frac{f\lambda}{R}. \quad (2.36)$$

Eficacitatea unui sistem concentrator este dată de câștigul de intensitate, definit ca raportul dintre intensitatea acustică în focar și intensitatea acustică în fasciculul incident

$$g = I_F / I_i. \quad (2.37)$$

Valoarea maximă a câștigului de intensitate este

$$g_M = (\pi R^2 / f\lambda)^2 \quad (2.38)$$

iar câștigul mediu în cuprinsul petei focale este

$$\bar{g} = 0,3116 (R^2 / f\lambda)^2. \quad (2.39)$$

Se observă că pata focală este cu atît mai mică cu cît frecvența ultrasunetului este mai mare, cu alte cuvinte concentrări mai eficace de energie se obțin în cazul undelor acustice de frecvență ridicată decît în cazul undelor de frecvență joasă.

Cu ajutorul sistemelor concentratoare se pot obține, chiar la distanțe de cîteva metri de emițător, intensități acustice de cîteva ori mai mari decît cele realizate cu un emițător obișnuit. Astfel, dacă $r_0 = 0,55$ mm și raportul $r_0/R = 1/300$, admitînd că 84% din energia totală este concentrată în pata focală, câștigul mediu de intensitate este de 1 100, dacă presupunem că coeficientul de reflexie corespunzător suprafeței reflectorului este

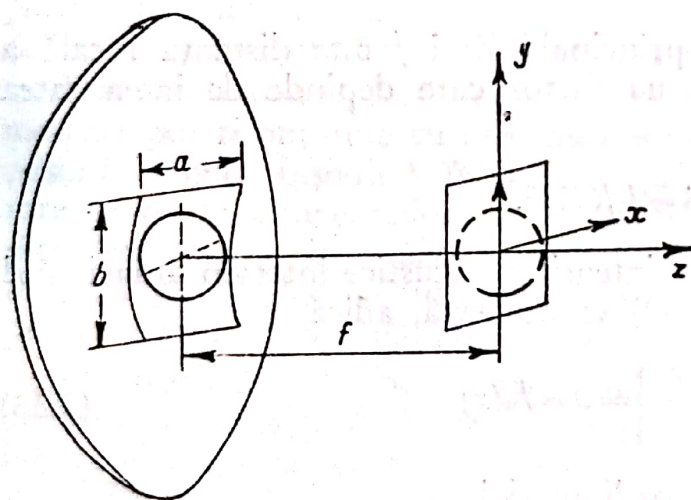


Fig. 2.21. Sistem de coordonate pentru reflector concav sau lentilă.

apropiat de unitate. În acest caz, câștigul maxim de intensitate acustică este egal cu 5 000.

Sistemele concentratoare de energie acustică mai prezintă încă un avantaj, acela de a se obține concentrația dorită într-un volum mic, aflat în interiorul mediului iradiat cu ultrasunete fără ca acestea să exercite vreo influență asupra părților învecinate. Acest lucru este de o deosebită

importanță, în special în aplicațiile ultrasunetelor de intensități mari în medicină și biologie.

2.5.1. Reflectori acustici. Un reflector acustic este analog unei oglinzi, care concentrează razele luminoase într-un focar. Pentru ca eficacitatea reflectorului să fie cât mai mare, trebuie ca materialul din care acesta este confecționat să aibă o impedanță caracteristică cât mai diferită de cea a fluidului în care se dorește să se realizeze concentrarea energiei ultrasunetelor. În plus, suprafața reflectantă trebuie să prezinte pierderi mecanice cât mai mici. Dacă concentrarea energiei acustice este necesară să fie făcută în apă, cele mai indicate materiale în acest scop pentru construirea unui reflector acustic sînt nichelul și oțelul. Se obține, în felul acesta, pentru energia reflectată un procent de 89% în cazul nichelului și de 88% în cazul oțelului din energia acustică incidentă pe suprafața de reflexie.

Există diferite modele de reflectori acustici. Un dispozitiv simplu este cel indicat în fig. 2.22. Reflectorul constă dintr-o suprafață perfect lucie, făcînd parte dintr-un paraboloid. Un transductor piezoelectric E , avînd suprafața mare și diametrul mare în comparație cu lungimea de undă,

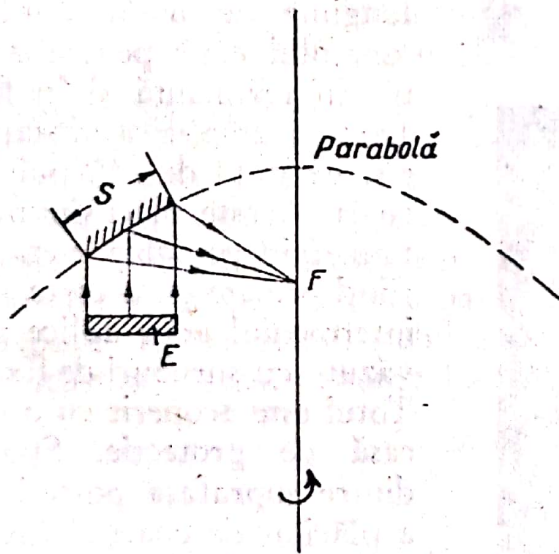


Fig. 2.22. Reflector parabolic.

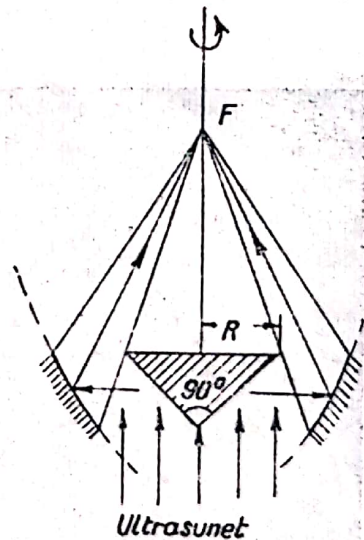


Fig. 2.23. Concentrator de energie acustică.

produce un fascicul de unde plane. Lovind suprafața reflectorului, undele sînt reflectate și converg în focarul F .

Un alt dispozitiv concentrator de energie acustică este cel conceput de A. Barone. Se compune din două reflectoare coaxiale, reflectorul interior fiind un con cu unghiul la vîrf egal cu 90° (fig. 2.23). Scopul acestui

reflector este de a transforma undele plane incidente, dirijate după axa dispozitivului, în unde cilindrice. Acestea, la rîndul lor, lovesc un al doilea reflector parabolic, care înconjoară conul și care, în urma reflexiei, transformă undele cilindrice în unde sferice, concentrîndu-se în focarul F .

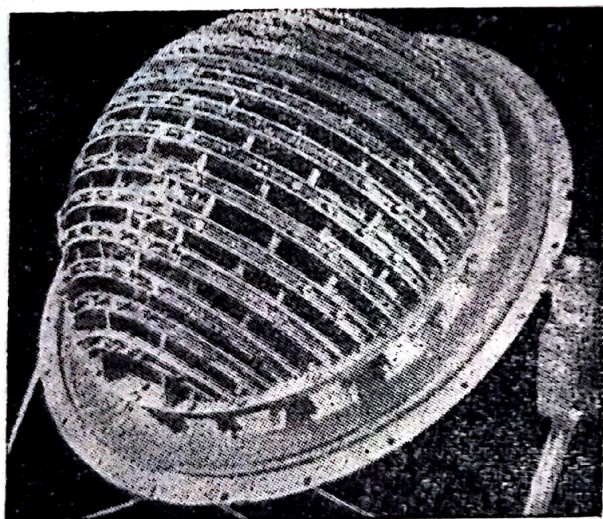
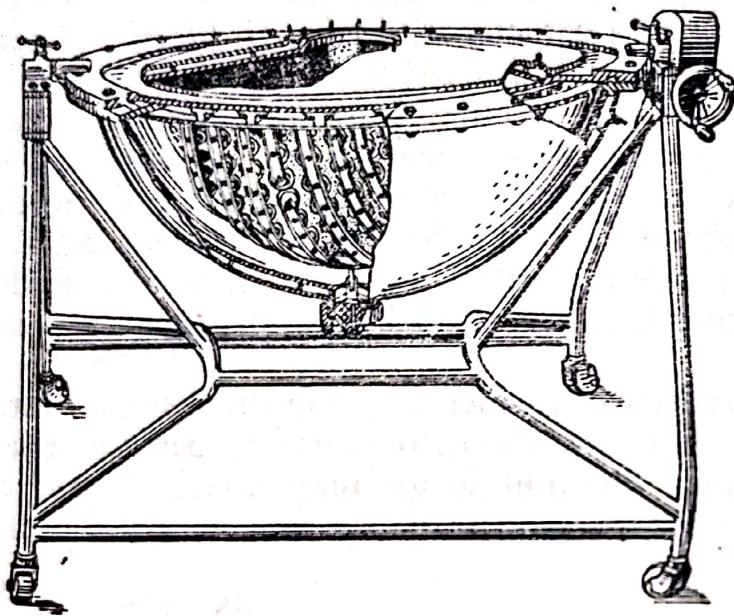


Fig. 2.24. Concentrator de energie acustică.

pe timpul funcționării emițătorului. La rîndul său uleiul este răcit cu un curent de apă. La partea interioară, suprafața calotei se găsește în contact cu lichidul în care urmează să se concentreze energia acustică (fig. 2.24).

Un reflector oarecum diferit de tipul celor arătate mai sus a fost realizat de L. D. Rosenberg. La acest dispozitiv elementele piezoelectrice emițătoare de ultrasunete sînt aplicate pe o calotă sferică, al cărui unghi de deschidere este de $\sim 75^\circ$, centrul sferei fiind în același timp focarul reflectorului. La exterior această suprafață metalică, avînd grosimea egală cu jumătate de lungime de undă a ultrasunetului emis pentru a intra în rezonanță și în felul acesta a amplifica vibrațiile, este excitată de 210 plăci de cuarț. Aceste plăci sînt montate rigid pe tabla metalică, fiind presate pe aceasta prin intermediul unor aplice prevăzute cu șuruburi de fixare. Totul este acoperit cu o carcasă de protecție. Spațiul dintre suprafața posterioară a plăcilor de cuarț și învelișul carcasei este umplut cu ulei, care permite mărirea rezistenței electrice și disiparea căldurii care se degajă

Reflectorul acustic construit de Rosenberg are raza suprafeței concentratorului egală cu 31,4 cm, fiind prevăzut să lucreze la frecvența de 500 kHz. Raza petei focale, determinată în urma măsurărilor, este în jur de 1,65 mm, iar suprafața petei focale este de aproximativ 0,09 cm², obținându-se o intensitate acustică medie superioară valorii de 30 000 W/cm². În centrul petei focale intensitatea este de aproape patru ori mai mare decât intensitatea medie, ceea ce corespunde la o presiune acustică de ~ 600 atm.

O variantă a acestui reflector acustic a fost indicată de M. A. Issakovici și M. G. Sirotiuk, cuprinzând două zone sferice de dimensiuni identice, montate pe un același ax, astfel încât focarele acestor zone să se suprapună (fig. 2.25).

Se obține o sporire a intensității acustice în focar, datorită pe de o parte rezonanței fiecărei cavități și pe de altă parte rezonanțelor sferei. Cu acest dispozitiv, 30% din energia dată mozaicului piezoelectric poate fi transferată în lichidul care umple sfera (apă).

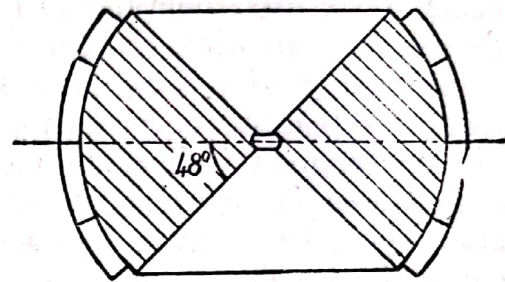


Fig. 2.25. Concentrator de forma unei părți de sferă.

2.5.2. Lentile acustice. Fenomenul de refracție, care constă din schimbarea direcției undelor acustice atunci când ele trec dintr-un mediu în altul, stă la baza construirii lentilelor acustice. Devierea undelor incidente paralele este astfel realizată încât întreaga energie este concentrată în focar. Cu toată diferența care există între lungimile de undă ale ultrasunetelor și cele corespunzătoare radiațiilor vizibile, totuși este posibil să se aplice aceleași relații stabilite pentru lentilele optice și în cazul lentilelor acustice. Astfel, distanța focală se poate calcula cu relația

$$f = \frac{R}{1 - \frac{c_m}{c_l}} = \frac{R}{1 - n} \quad (2.40)$$

în care R este raza de curbură a suprafeței lentilei, c_l viteza de propagare a undelor acustice prin mediul din care este constituită lentila, c_m viteza de propagare a undelor acustice prin mediul exterior lentilei și n indicele de refracție acustică, definit prin raportul dintre vitezele de propagare a ultrasunetului în mediul exterior și în lentilă.

Dacă, în cazul undelor luminoase, întotdeauna viteza de propagare a luminii prin lentilă este mai mică decât viteza de propagare a luminii prin mediul înconjurător, adică întotdeauna $c_l < c_m$, iar expresia (2.40) este pozitivă, în cazul undelor acustice viteza de propagare a ultrasune-

telor în lentilă poate fi sau mai mare, sau mai mică decât cea corespunzătoare mediului exterior. Aceasta depinde de natura mediilor în contact. Așadar, spre deosebire de lentilele optice, când o lentilă convexă concentrează energia luminoasă în focar, lentilele acustice pot fi confecționate dintr-un material în care viteza sunetului poate fi mai mare sau mai mică decât viteza ultrasunetului în mediul înconjurător, cu alte cuvinte indicele de refracție acustică va fi mai mare sau mai mic decât unitatea.

Atunci când $c_l < c_m$, deci $n < 1$, expresia (2.40) devine pozitivă, iar focarul se găsește de aceeași parte a centrului de curbură. Astfel, o lentilă confecționată dintr-un mediu solid, lucrînd într-un lichid, va concentra energia acustică atunci când va fi concavă și va fi divergentă atunci când ea va avea forma convexă. În această categorie intră lentilele confecționate din aluminiu sau din mase plastice.

Atunci când $c_l < c_m$, deci $n > 1$, expresia (2.40) devine negativă, iar focarul se găsește în partea opusă celei unde se află centrul de curbură. În acest caz, o lentilă convexă este convergentă, în timp ce o lentilă concavă este divergentă. În această categorie intră lentilele confecționate dintr-un înveliș foarte subțire, însă rezistent, formînd o cavitate închisă, umplută cu un gaz sau un lichid în care viteza de propagare a ultrasunetului să fie mai mică decât valoarea vitezei ultrasunetului în mediul înconjurător. Dacă lentila este destinată să lucreze în aer, se folosește bioxidul de carbon, cunoscînd că viteza ultrasunetului în acest gaz este de aproximativ 1,3 ori mai mică decât în aer. Dacă lentila este destinată să lucreze într-un lichid, în cavitatea lentilei se poate introduce tetraclorură de carbon.

Cu toate că, teoretic, și lentilele biconvexe au, în anumite condiții, posibilitatea de a concentra într-un focar energia acustică, totuși în practică ele sînt puțin utilizate. Aceasta se datorește în primul rînd dificultăților care intervin la construcția unor asemenea lentile, ele trebuind să aibă un înveliș foarte subțire pentru a nu influența propagarea undelor acustice, însă, în același timp, învelișul trebuie să fie și foarte rezistent ca să nu permită deformarea cavității. La acestea se adaugă și faptul că însăși operația de umplere a cavității cu gazul sau lichidul ales necesită o tehnică aparte. În al doilea rînd, eficacitatea unor lentile biconvexe nu este atît de mare ca aceea a lentilelor concave, confecționate din medii solide, iar aberația de sfericitate este mai pronunțată la primele.

Din relația (2.38), care dă cîștigul mediu de intensitate acustică în cuprinsul petei focale, se constată că acesta depinde de distanța focală, fiind cu atît mai mare cu cît distanța focală este mai mică. Pe de altă parte, din (2.40) rezultă că mărimea distanței focale este funcție de indicele de refracție acustică, fiind cu atît mai mică cu cît valoarea indi-

celui, deci raportul vitezelor ultrasunetului prin lentilă și prin mediu, este mai mic. Aceasta impune pentru construirea lentilelor acustice alegerea unui material la care viteza de propagare a undelor ultrasonice să fie cât mai diferită cu puțință de viteza de propagare a aceluiași undă prin mediul înconjurător. Totodată, însă, pentru a se reduce la minim pierderile de energie acustică ce s-ar produce la trecerea undelor dintr-un mediu în altul impedanțele caracteristice ale celor două medii trebuie să fie cât mai apropiate. Pentru îndeplinirea acestui deziderat este necesar ca raportul densităților mediilor să fie pe cât posibil invers proporțional cu raportul vitezelor ultrasunetului din aceleași medii.

Ținând seama de condițiile de mai sus, lentilele acustice se confecționează obișnuit din aluminiu și din plexiglas. În cazul ultimului material, pierderile de energie provenite din cauza reflexiilor la suprafața de separare a mediilor sînt mai mici decît la aluminiu, datorită faptului că impedanța caracteristică a plexiglasului este de aproximativ 5 ori mai mare decît cea corespunzătoare aluminiului, fiind foarte apropiată de impedanța caracteristică a unui lichid. Astfel, ea este de două ori mai mare decît impedanța caracteristică a apei la 20°C. La frecvențe mai mari de 2—3 MHz, însă, pierderile de energie acustică prin absorbție în masa plexiglasului devin apreciable, încît din acest punct de vedere există o limitare în utilizarea lentilelor din plexiglas. În domeniul frecvențelor înalte sînt de preferat lentilele din aluminiu, cu toate că și acestea prezintă dezavantajul de a poseda o impedanță caracteristică ridicată. Pentru îmbunătățirea calității unei astfel de lentilă acustică, se acoperă suprafața lentilei cu un strat din plexiglas sau din bachelită, care îndeplinește rolul de adaptor de impedanță. O asemenea lentilă, care asigură o transmitere de 90% din energia acustică incidentă, poate fi folosită pînă la frecvențe destul de ridicate (10—15 MHz).

Cum plexiglasul este o substanță care poate să fie dizolvată cu ușurință de numeroase lichide organice, au fost concepute dispozitive speciale de concentrarea energiei la care se evită contactul direct între plexiglas și lichidul înconjurător. Un astfel de dispozitiv cuprinde o lentilă plan-concavă, suprafața plană fiind aplicată peste placa de cuarț care vibrează, iar în cavitate este introdus un lichid care nu atacă materialul lentilei, de exemplu apă distilată. Cavitatea concavă este delimitată în exterior de o membrană de mică (fig. 2.26).

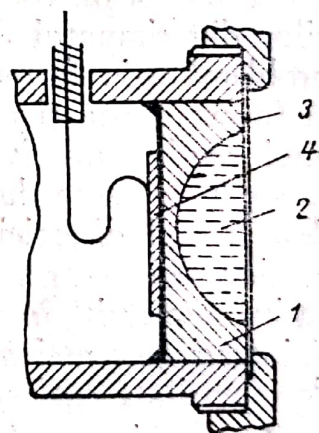


Fig. 2.26. Lentilă acustică pentru lichide care atacă plexiglasul:

- 1 — plexiglas; 2 — lichid;
- 3 — membrană de mică;
- 4 — cuarț.

Lichidul din cavitate alcătuiește o nouă lentilă cuplată cu lentila din plexiglas. În acest caz distanța focală a lentilei duble se poate determina utilizând relația cunoscută din optică

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (2.41)$$

în care f_1 este distanța focală a lentilei solide, care datorită faptului că lentila este concavă are valoare pozitivă și f_2 distanța focală a lentilei cu lichid, a cărei valoare poate să fie pozitivă sau negativă depinzând de mărimile vitezei ultrasunetului în lichidul lentilei și în mediul înconjurător.

Cu ajutorul unor asemenea lentile se poate obține o amplificare a energiei acustice în focar pînă la o sută de ori.

În loc de a se folosi o lentilă acustică specială, aplicată pe suprafața plană a unei plăci piezoelectrice, s-a căutat să se utilizeze pentru concentrarea energiei placa însăși. În acest scop, s-a dat cristalului de cuarț o formă concavă. Aplicată în cazul acestui material piezoelectric metoda este destul de greoaie; avînd în vedere greutatea polizării cristalului pentru a i se da forma convenabilă. Aplicarea la emițătoarele ultrasonice a plăcilor din titanatul de bariu a reușit să soluționeze convenabil și această problemă prin faptul că materialul ceramic poate fi modelat cu ușurință la forma dorită și poate fi polarizat în mod convenabil pentru obținerea unui randament cît mai bun în operația de concentrare a energiei. De exemplu un transductor concav din titanat de bariu poate fi polarizat de-a lungul direcției de curbură, astfel încît concentrarea energiei să se producă în centrul de curbură. Cu un asemenea cristal de titanat de bariu, care emite în apă un fascicul ultrasonic avînd frecvența de 2,5 MHz și intensitatea mai mică de 1 W/cm², s-a putut obține în focar un cîștig de intensitate egal cu 1 500.

În ce privește aberația de sfericitate, aceasta este mai redusă în cazul lentilelor la care $n < 1$, cu alte cuvinte la lentile acustice solide, decît la cele la care $n > 1$. Cercetările efectuate în această direcție de către B. D. Tartakovski au arătat că în cazul primei categorii de lentile acustice există un domeniu de valori ale lui n ($0,2 < n' < 0,3$), pentru care valorile aberației de sfericitate a lentilei devin minime.

Necesitatea obținerii într-un element de volum cît mai redus a unei energii acustice cît mai ridicate, a dus la realizarea unui ansamblu de emițătoare ale căror fascicule au axele convergente. Un asemenea dispozitiv cuprinde 4 emițătoare cu plăci de cuarț avînd forma concavă, astfel dimensionate și dirijate încît focarele tuturor lentilelor să coincidă. Acest

emițător complex, folosit cu precădere în chirurgia craniană, lucrează cu o frecvență de ~ 1 MHz, putându-se obține în focar o intensitate acustică egală cu 100 W/cm^2 , care ar corespunde unei presiuni variabile de 55 atm.

2.6. TRANSFORMATOARE ACUSTICE

În cazul transductoarelor magnetostrictive, în scopul concentrării energiei acustice în locul dorit, se folosesc bare de secțiune variabilă aplicate materialului care vibrează și care lucrează ca un transformator acustic, analog transformatorului electric. Prin utilizarea unui transformator acustic se obține o creștere a valorii vitezei particulei, raportul dintre mărimea vitezei în dreptul secțiunii de la extremitatea barei (vîrf) și mărimea vitezei în dreptul secțiunii de fixare a barei la transductor, fiind factorul de amplificare al transductorului.

Ecuția diferențială care definește propagarea undelor longitudinale plane într-o bară de secțiune variabilă (fig. 2.27) este

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} (\ln S_x) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.42)$$

în care Φ este potențialul de viteze S_x aria secțiunii barei la distanța x de originea acesteia, c viteza de propagare a undelor acustice prin materialul din care este confecționată bara.

Este evident că ecuația undelor va lua forme diferite în raport cu modul de variație a secțiunii barei în lungul acesteia. Această variație poate fi liniară, exponențială, parabolică sau catenoidală, în care caz transformatorul are forma conică exponențială, parabolică sau catenoidală.

În cazul unui transformator exponențial variația secțiunii barei este dată de relația

$$S_x = S_0 e^{-mx} \quad (2.43)$$

în care S_0 este secțiunea la originea barei și m o constantă care caracterizează modul exponențial de variație a secțiunii în lungul barei.

Tinînd seama de funcția de variație a secțiunii rezultă

$$\frac{\partial}{\partial x} (\ln S_x) = -m$$

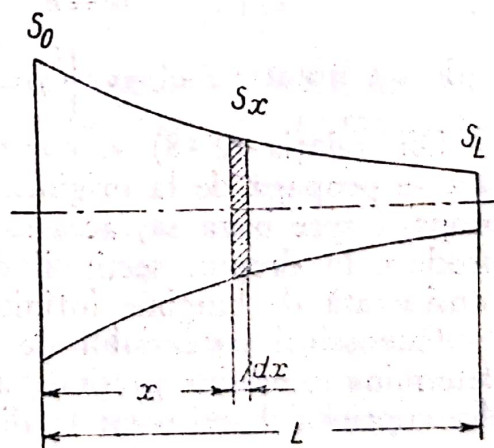


Fig. 2.27. Transformator acustic.

care introdusă în ecuația undelor (2.42), aceasta devine

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - m \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}. \quad (2.44)$$

Considerînd că soluția generală a ecuației este de forma

$$\Phi = C e^{j(\omega t + \gamma x)} \quad (2.45)$$

înlocuind pe Φ și derivatele sale în ecuația (2.44), se obține

$$\omega^2 = c^2(\gamma^2 + jm\gamma). \quad (2.46)$$

Notînd $\omega/c = k$ și rezolvînd ecuația în raport cu γ , rezultă

$$\gamma = -j \frac{m}{2} \pm \sqrt{k^2 - \frac{m^2}{4}}. \quad (2.47)$$

Introducînd în ecuația (2.45) valorile astfel găsite ale lui γ , se obține soluția generală a ecuației diferențiale a propagării undelor longitudinale în transformatorul acustic exponențial

$$\Phi = e^{\frac{m}{2}x} \left(A e^{-j \sqrt{k^2 - \frac{m^2}{4}} x} + B e^{j \sqrt{k^2 - \frac{m^2}{4}} x} \right) e^{j\omega t}$$

unde A și B sînt două constante care pot fi determinate prin condițiile la limită. Relația se mai poate scrie

$$\Phi = e^{\frac{m}{2}x} \left(A e^{-j \frac{\omega}{c'} x} + B e^{j \frac{\omega}{c'} x} \right) \quad (2.48)$$

unde s-a notat cu $c' = c / \sqrt{k^2 - \frac{m^2}{4}}$.

Din relația (2.48) se constată că în bară există două unde, o undă care se propagă de la originea transformatorului spre vîrf și alta care se propagă spre baza sa, această undă provenind în urma reflexiei care se produce în dreptul secțiunii de la vîrf, atît timp cît bara nu poate fi considerată de lungime infinită.

Cunoscînd potențialul de viteze și folosind relațiile curențe se pot determina expresiile presiunii acustice și a vitezei particulei într-un punct din cuprinsul barei aflat la distanța x de origine, anume

$$p_x = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -j\rho\omega e^{\frac{m}{2}x} \left(A e^{-j \frac{\omega}{c'} x} + B e^{j \frac{\omega}{c'} x} \right) e^{j\omega t} \quad (2.49)$$

și

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = e^{\frac{m}{2}x} \left[A \left(\frac{m}{2} - j \frac{\omega}{c'} \right) e^{-j \frac{\omega}{c'} x} + B \left(\frac{m}{2} + j \frac{\omega}{c'} \right) e^{j \frac{\omega}{c'} x} \right] e^{j\omega t} \quad (2.50)$$

unde ρ este densitatea materialului din care este confecționată bara.

În cazul transformatorului acustic este important să se cunoască mărimile vitezei particulei în dreptul secțiunilor limită ale barei la origine și la vîrf, anume:

— pentru $x=0$

$$v_0 = \left[A \left(\frac{m}{2} - j \frac{\omega}{c'} \right) + B \left(\frac{m}{2} + j \frac{\omega}{c'} \right) \right] e^{j\omega t}; \quad (2.51)$$

— pentru $x=L$

$$v_L = e^{\frac{m}{2}L} \left[A \left(\frac{m}{2} - j \frac{\omega}{c'} \right) e^{-j \frac{\omega}{c'}L} + B \left(\frac{m}{2} + j \frac{\omega}{c'} \right) e^{j \frac{\omega}{c'}L} \right] e^{j\omega t}. \quad (2.52)$$

Un caz important în practică este acela în care bara are o lungime egală cu un număr întreg de jumătăți de lungime de undă, adică

$$L = n \frac{\lambda'}{2} \quad (2.53)$$

în care $\lambda' = c'/f$, astfel încît $\frac{\omega}{c'} L = n\pi$, unde n este un număr întreg.

Ținînd seamă că $e^{-jn\pi} = (-1)^n$ și $e^{jn\pi} = (-1)^n$, relația (2.52) se mai poate scrie

$$v_L = (-1)^n e^{\frac{m}{2}L} \left[A \left(\frac{m}{2} - j \frac{\omega}{c'} \right) + B \left(\frac{m}{2} + j \frac{\omega}{c'} \right) \right] e^{j\omega t}. \quad (2.54)$$

Cunoscînd expresiile vitezei particulei în secțiunile limită ale barei exponențiale, se poate calcula factorul de amplificare N al transformatorului acustic așa cum a fost definit mai sus

$$N = \frac{v_L}{v_0} = (-1)^n e^{\frac{m}{2}L} = \pm \sqrt{\frac{S_0}{S_L}}. \quad (2.55)$$

Rezultă că factorul de amplificare este cu atît mai mare cu cît raportul ariilor secțiunilor extreme ale barei sînt mai diferite. Din această expresie se poate scoate valoarea lui m în funcție de factorul de amplificare și de lungimea barei, anume

$$m = \frac{2 \ln N}{L} \quad (2.56)$$

relație importantă pentru proiectarea transformatorului acustic, deoarece în raport cu necesitatea de amplificare a vitezei, deci ținînd seamă de factorul N , și în raport cu lungimea barei, se poate stabili constanta care caracterizează modul exponențial de scădere a secțiunii barei în lungul ei.

Folosind relațiile (2.53) și (2.56) se poate deduce o nouă expresie care permite calculul lungimii barei în funcție de necesitățile de amplificare și de condițiile de lucru (frecvența ultrasunetului). Expresia (2.53) se mai poate scrie

$$L = n \frac{\lambda'}{2} = n \frac{c'}{2f} = \frac{n}{2f} \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{m^2 c^2}{4\omega^2}}} \quad (2.53 \text{ bis})$$

Introducând valoarea lui m găsită mai sus se obține

$$L \sqrt{1 - \frac{(2 \ln N)^2}{L^2} \frac{c^2}{4\omega^2}} = \frac{nc}{2f}$$

din care scoțind valoarea lui L , rezultă.

$$L = \frac{nc}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{n\pi} \right)^2} \quad (2.57)$$

Din necesități funcționale secțiunea barei exponențiale poate lua forme diferite: circulară, dreptunghiulară sau inelară (fig. 2.28). Relațiile (2.55), (2.56) și (2.57) fiind

Fig. 2.28. Transformatoare acustice de forme diferite.

generale, își păstrează valabilitatea pentru toate barele exponențiale cu secțiuni de orice formă. Diferența constă doar în expresiile care permit calculul ariilor secțiunilor și anume:

- secțiune circulară $S_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}$, $S_L = \frac{\pi D_L^2}{4}$, iar $N = \frac{D_0}{D_L}$
- secțiune dreptunghiulară $S_0 = a_0 b_0$, $S_L = a_L b_L$, iar $N = \sqrt{\frac{a_0 b_0}{a_L b_L}}$
- secțiune inelară $S_0 = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$, $S_L = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$, iar $N = \frac{D}{\sqrt{D^2 - d^2}}$

Din expresia (2.50) rezultă că viteza particulei variază în lungul barei și se poate anula în dreptul anumitor secțiuni ale barei, deci pentru anumite valori ale lui x . Așadar, în lungul barei există puncte de viteză nule sau puncte nodale, a căror cunoaștere servește la stabilirea locurilor de fixare a transformatorului acustic. Deci, din relația (2.50), punând condiția $v_x = 0$ rezultă

$$A \left(\frac{m}{2} - j \frac{\omega}{c'} \right) e^{-j \frac{\omega}{c'} x} + B \left(\frac{m}{2} + j \frac{\omega}{c'} \right) e^{j \frac{\omega}{c'} x} = 0. \quad (2.58)$$

Folosind relațiile lui Euler și luând numai partea reală expresia (2.58) devine

$$(A+B) \left[\frac{m}{2} \cos \left(\frac{\omega}{c'} x \right) - \frac{\omega}{c'} \sin \left(\frac{\omega}{c'} x \right) \right] = 0$$

sau

$$\frac{m}{2} - \frac{\omega}{c'} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega}{c'} x \right) = 0 \quad (2.59)$$

de unde

$$x_{nod} = \frac{c'}{\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{mc'}{2\omega} + n'\pi \right) \quad (2.60)$$

n' fiind un număr întreg.

Ținând seama de condiția relativă la lungimea barei de a fi egală cu un număr întreg de lungimi de undă, expresia (2.60) se mai poate scrie succesiv

$$x_{nod} = \frac{\lambda'}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{m\lambda'}{4\pi} + n'\pi \right) \quad (2.60')$$

sau

$$x_{nod} = \frac{L}{n\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{mL}{2n\pi} + n'\pi \right) \quad (2.60'')$$

expresie care se mai poate pune și sub forma

$$x_{nod} = \frac{L}{n\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{n\pi} \ln N + n'\pi \right) \quad (2.60''')$$

Primul punct nodal se va determina pentru cazul $n' = 0$.

La stabilirea relațiilor care caracterizează transformatorul acustic exponențial s-a făcut abstracție de faptul că la vârful barei se montează o sculă, datorită căreia sînt modificate într-o oarecare măsură condițiile de propagare a undelor longitudinale. Considerînd pentru simplificare că scula este un cilindru de lungime l și de secțiune constantă și egală cu secțiunea terminală a barei exponențiale (fig. 2.29), atunci viteza particulei la capătul exterior al sculei va fi

$$v_s = v_L / \cos k_s l \quad (2.61)$$

unde $k_s = \omega/c_s$, iar c_s este viteza de propagare a ultrasunetului în materialul din care este confecționată scula.

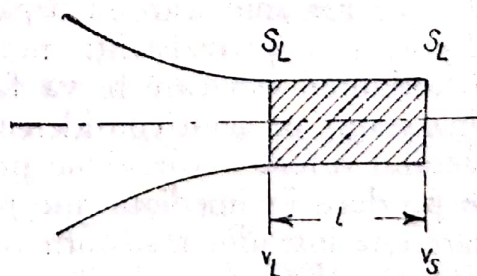


Fig. 2.29. Transformator acustic avînd la capăt montată scula.

În acest caz factorul de amplificare al transformatorului acustic se modifică devenind

$$N = \frac{v_L}{v_0} = \frac{v_L}{v_s} \cdot \frac{v_s}{v_0} = N' \cos k_s l. \quad (2.62)$$

în care s-a notat cu N' factorul de amplificare corespunzător ansamblului dispozitivului cuprinzînd transformatorul exponențial și scula de la vîrfurile acestuia. Din (2.62) rezultă că N este mai mic decît N' , cu alte cuvinte prezența sculei face ca viteza vibrațiilor să crească și mai mult.

Studiul transformatoarelor acustice s-a făcut în ipoteza existenței în lungul barelor doar a undelor longitudinale. Pentru ca această ipoteză să-și păstreze valabilitatea este necesar ca dimensiunile liniare ale secțiunilor celei mai mari a barei să nu depășească jumătate din lungimea undei care se propagă în transformator. Îndeplinirea în practică a acestei condiții este posibilă, neconducînd nici la dimensiuni prea exagerate și nici la dimensiuni prea mici, aceasta datorită faptului că domeniul de frecvență a emițătoarelor magnetostrictive este destul de îngust și se situează la limita inferioară a frecvenței ultrasunetelor. Dacă dimensiunile liniare ale secțiunilor barei ar depăși jumătate din lungimea de undă, în bară, pe lîngă undele longitudinale plane, ar mai apărea niște unde complexe, fapt care contribuie la micșorarea simțitoare a eficacității transformatorului acustic.

În timpul funcționării, transformatorul acustic suferă eforturi mecanice apreciabile, ale căror valori sînt variabile în lungul barei și pot fi calculate cu ajutorul relației

$$\tau = j \frac{E}{\omega} \frac{dv_x}{dx} \quad (2.63)$$

unde E reprezintă modulul de elasticitate al materialului din care este confecționat transformatorul.

Este necesar ca în nici o porțiune din bară să nu existe deformări și eforturi mecanice care să depășească limitele admisibile în ceea ce privește elasticitatea și rezistența materialului respectiv. De aceea, la alegerea materialului din care se va face transformatorul acustic se impune să se țină seama de acest considerent, precum și de faptul că pe timpul lucrului metalul suferă o coroziune provenită, fie de la efectul de cavitație, care se produce în imediata apropiere a barei, fie de la un mediu agresiv în care este introdus transformatorul. Ca materiale pentru asemenea dispozitive sînt folosite oțelurile de diferite tipuri, în special oțelul austenitic inoxidabil, rezistent la coroziune, precum și unele metale neferoase, cum ar fi alama.

Fixarea transformatorului acustic la transductorul magnetostrictiv, mai precis la pachetul de tole, se poate face fie prin lipire directă, fie prin înșurubare la o piesă intermediară a cărei lungime este egală cu un sfert de lungime de undă, piesă fixată rigid de pachetul de tole. Pentru a se evita pierderile în propagarea undelor longitudinale este necesar să se acorde toată atenția fixării atât a barei la transductor, cât și a sculei la vârful barei, evitându-se golurile de aer sau porțiuni nelipite.

Dezvoltarea tehnicii sudurii cu ajutorul ultrasunetelor, în care caz se folosesc vibrații de torsiune, a impus studierea și creerea de transformatori acustici în care nu se mai propagă unde longitudinale, ci unde de torsiune. Un asemenea transformator acustic are forma tot unei bare de secțiune variabilă, iar ecuația diferențială de propagare a undelor este în acest caz

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} (\ln I) = \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (2.64)$$

în care θ este deplasarea unghiulară, I momentul de inerție polar al secțiunii barei, iar c_t viteza de propagare a undelor transversale prin materialul din care este confecționată bara.

Comparînd această expresie cu ecuația (2.42), se constată o deplină analogie între acestea, astfel încît studiul unui transformator pentru unde de torsiune se poate face în mod analog cu studiul efectuat pentru transformatorul cu vibrație longitudinală. Ținînd seama de specificul unui transformator destinat vibrațiilor de torsiune avînd profilul exponențial, factorul de amplificare va fi egal cu raportul dintre momentele de inerție polare corespunzătoare secțiunii de la bază și cele de la vârful barei.

BIBLIOGRAFIE

1. Pimonow, L., *Une sirène ultrasonore de grande puissance*, Annales de Telecommunication, 6, 1, 23—26, 1951.
2. Mednikov, E. P., *Dve konstrukcii eksperimentalnih zvukovih siren*, Akusticheskii Jurnal, 4, 1, 59—63, 1958.
3. Burov, A. K., *Polucenie bolshih intensivnosti ultrazvuka v jidkosti*, Akusticheskii, Journal, 4, 4, 315—320, 1958.
4. Lesniak, B., *Some constructional problems of ultrasonic gaz generators*, Proc. of the II Conference on ultrasonics, Warszawa, 1957, p. 59—63.
5. Pollnikov, E. Ergisk, *Ultrazvukovite generatori*, Jurnal tehniceskoi fiziki, 22, 1677, 1952.
6. Maszewski-Rowinski, B., *Syrena ultradzwlekowa C 10 P*, Prace Centralnego Instytutu Ochrony Pracy, 7, 1, 1—25, 1957.

7. Brun, E., Boucher, R.M.G., *Research on the Acoustic Air Jet Generator*, J.A.S.A., 29, 5, 573—583, 1957.
8. Gavreau, V., *Generateurs pneumatiques d'ultrasons intenses*, Acustica, 8, 3, 121—130, 1958.
9. Rosenberg, L. D., *La génération et l'étude des vibrations ultrasonore de très grande intensité*, Acustica, 12, 1, 40—49, 1962.
10. Filipczinski, L., *Properties of the X-cut quartz transducer*. Proc. of the II Conference on Ultrasonics. Warszawa, 35—47, 1957.
11. Kogan, I. N., Menes, L. I., *Ultrazvukovoi izluciateli balşoi intensivnosti na titanate baria*. Akusticeskii jurnal, 3, 1, 62—64, 1957.
12. Van der Burgt, C. M., *Neue keramische Ultraschallwandler und deren Kopplung an die Flüssigkeit*, Proceedings of the third International Congress on Acoustics Stuttgart, vol. II, 1219—1321, 1959.
13. Floyd, Dunn, Brreyer, J. E., *Generation and Detection of Ultrahigh-Frequency Sound in Liquids*, J.A.S.A., nr. 6, 775—778, 1962.
14. Stewart, E. S., Stewart, J. L., *Hypersonic Resonance of Quartz from 3 000 to 10 000 Megacycles*, Proceedings of the fourth international Congres on Acoustics Copenhagen, K. 12, 1962.
15. May, J. E., *New Trends in Ultrasonic Device Technology*. Proceedings of the fourth International Congress on Acoustics, Copenhagen, K. 31, 1962.
16. Pajewski, W., *Piezoelectric Ceramics Applied to High Power Transducers*, Proceedings of the Symposium on Electroacoustics transducers, Warszawa, p. 259—271, 1961.
17. Pajewski, W., *Les vibrations et les rayonnements des discs piezoélectriques céramiques*, Lucrările celei de a treia Conferințe de Acustică, Budapesta, p. 327—331, 1964.
18. Neppiras, E. A., *Very High-Energy Ultrasonic*, British Journal of Appl. Phys., 11, 4, 143—150, 1960.
19. Ananieva, A. A., *Investigation of Barium Titanat Ceramics for Construction of Electroacoustic Equipment*, Proceedings of the Symposium on Elektroakustic transducers, Warszawa, p. 211—224, 1961.
20. Baranski, K. N., *Vozdusdenie v kvarțe kolebanii generzvukovîh ciastot*, Docl. Akad. Nauk. S.S.S.R., 114, 517, 1957.
21. Brömmel, H. E., Drousfeld, K., *Excitation of Very High Frequency Sound in Quartz*, Phys. Rev. Letters, 1, 234, 1958.
22. Goleamina, I. P., Szyskina, N. F., *Certain Technological Problems of Ferrite Production for Acoustical Purposes*, Proceedings of the Symposium on Electroacoustic transducers, Warszawa, p. 175—182, 1961.
23. Smolinski, A., *Magnetostriction and magnetostrictive materials*, Proceedings of the Symposium on Electroacoustic transducers, Warszawa, p. 159—173, 1961.
24. Goleamina, I. P., *Magnetostrikțione ferrit kak material dlia electroakusticesťih preobrazovatelei*, Akusticeski jurnal, 6, nr. 3, 311—320, 1960.
25. Van der Burgt, C. M., Stuïts, A. L., *Low Porosity Ferrites for High Intensity Ultrasonic Radiator*, Proceedings of the fourth International Congress on Acoustics Copenhagen, K. 22, 1962.
26. Eisenmenger, W., *Experimentelle Bestimmung der Stoßfrontdicke aus dem akustischen Frequenzspektrum elektromagnetisch erzeugter Stoßwellen in Flüssigkeiten*, Acustica, 14, 4, 187—204, 1964.
27. Whymark, R. R., *Utilisation of Magnetostrictive Materials in Generating Intense Sound*, J.A.S.A., 33, 6, 725—732, 1961.

28. Kikuchi, Y., *Performances of Magnetostrictive Transducers*, J.A.S.A., 29, 5, 569—573, 1957.
29. Roy, N. A., Frolov, D. P., *Generation of Sound by Spark Discharges in Water*. Al III-lea Congres Internațional de Acustică, Stuttgart, 1959.
30. Eisenmenger, W., *Eine elektromagnetische Impulsschallquelle*. Al III-lea Congres Internațional de Acustică, Stuttgart, 1959.
31. Schöder, G. R., Wirkhorst, F., *Elektrostatic Transducers with Solid Dielectric for Waterborne Sound*, Acustica, 7, 1, 38—45, 1957.
32. Bernath, A., *Contribuții la studiul transferului impulsurilor ultrasonice prin pelicula de cuplare a palpatorilor*. Studii și Cercetări Șt. Tehnice. Baza de cercetări Științifice de la Timișoara a Academiei Republicii Socialiste România, 7, 1—2, 95—108, 1960.
33. Wehr, J., *The Application of Nonreflecting Transducers in ultrasonic Measurements*, Proceedings of the third International Congress on Acoustics, Stuttgart, vol. II, 1207—1210, 1959.
34. O'Neil, H. T., *Theory of Focusing radiators*, J.A.S.A., 21, 5, 516—526, 1949.
35. Haritonov, A. V., *Krutilnie ultrazvukovie končetratorî*, Akusticeski jurnal, VII, 3, 387, 1961.
36. Tartakovski, B. D., *O sfericeskoi oberoții tverdîh zvukovîh fokusiruiuşih linz*, Akusticeski jurnal, 7, 3, 349—357, 1961.
37. Sirotiuk, M. G., *Fokusiruiuşcii končetrator ultraszvuka iz tverdovo materiala*, Akusticeski jurnal, 8, 1, 124—128, 1962.
38. Tartakovski, B. D., *Ob abervaţionîh karaktetika zvukovîh linz*, Akusticeski jurnal, 8, 3, 350—357, 1962.
39. Merculov, L. G., *Rascet ultrazvukovîh končetratorov*, Akusticeskii jurnal, 3, 3, 230—238, 1957.
40. Sette, D., *Ultrasonic Lenses of Plastic Materials*, J.A.S.A., 21, 4, 375—381, 1949.
41. Tarnoczy, T., Illenyi, A., *Akustische Zonenlinsen*, Proceedings of the third International Congress on Acoustics, Stuttgart, vol. II, p. 1233—1237, 1959.
42. Issakovici, M. A., Sirotiuk, M. G., *A solid resonant device for ultrasound focusing*. Proceedings of the fourth international Congress on Acoustics, Copenhagen, K. 55, 1962.
43. Mori, E., *Analysis of an Ultrasonic Exponential Solid Horn with a Tool and its Design Considering Fatigue Limit*. Bulletin of the Tokyo Institute of Technology, nr. 43, 19—39, 1961.
44. Bruma, M., *Generations d'ondes élastiques dans divers milieux matériels provoquée par irradiation Laser*, 5^e Congrès International d'acoustique, Liège, 1965.
45. Griffing, V., Fox, F. E., *Theory of Ultrasonic Intensity Gain Due to Concave Reflectors*, J.A.S.A., 21, 4, 348—351, 1949.
46. Ensminger, D., *Solid Cone in Longitudinal Half Wave Resonance*, J.A.S.A., 32, 2, 194—196, 1960.

3

PROPAGAREA ULTRASUNETELOR

3.1. PROPAGAREA ULTRASUNETELOR ÎN GAZE

3.1.1. Viteza de propagare a undei acustice. Dispersia. În gaze, propagarea ultrasunetelor se poate face numai prin unde longitudinale. În § 1.2, atunci când s-a prezentat ecuația de propagare a unor asemenea unde s-a văzut că în ecuație este inclus un parametru c , denumit viteza de propagare a undelor, sau viteza sunetului. Această mărime reprezintă o caracteristică a mediului prin care se propagă sunetul, respectiv ultrasunetul, și pentru o anumită temperatură și presiune poate fi considerată independentă de frecvență într-o bandă destul de largă. Într-adevăr, chiar și în domeniul ultrasunetelor, pînă la frecvențe de cîțiva megaherți, variațiile vitezei undei acustice nu depășesc 30%, ceea ce face ca în practică, să se poată considera viteza ca o constantă. La frecvențe de ordinul zecilor de megaherți și mai ridicate, această variație nu mai poate fi neglijată, intervenind anumite fenomene care vor fi studiate în detaliu în cele ce urmează.

Ținînd seama că pe timpul unei perioade, la o comprimare mediul elastic se încălzește și la o rarefiere el se răcește, relația corespunzătoare vitezei de propagare a undei acustice se poate stabili în două ipoteze și anume, una care presupune că schimbările de volum sînt izoterme și alta care presupune că aceste schimbări de volum sînt adiabactice. În primul caz expresia vitezei este

$$c = \sqrt{\frac{p_0}{\rho}} \quad (3.1)$$

iar în cel de-al doilea caz expresia vitezei este

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho}} \quad (3.2)$$

unde p_0 este presiunea la care se găsește gazul prin care se propagă unda, aflat în stare de repaos; în cazul aerului $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ și este presiunea atmosferică, ρ densitatea mediului și κ raportul căldurilor specifice, variabil după numărul atomilor existenți în moleculă. Astfel, în cazul gazelor monoatomice $\kappa = 1,67$, pentru gaze biatomice $\kappa = 1,41$, iar pentru gaze triatomice $\kappa = 1,33$.

Cum valorile determinate pe cale experimentală sînt mult mai apropiate de cele calculate prin aplicarea relației (3.2) decît cele obținute cu ajutorul relației (3.1.), rezultă că fenomenul propagării undelor acustice este foarte apropiat de un fenomen adiabatic și ca urmare în cuprinsul lucrării se va lua în considerare numai relația (3.2).

Cunoscînd că în cazul unui gaz ideal este valabilă binecunoscuta lege

$$pV = RT \quad (3.2 \text{ bis})$$

unde V este volumul molar al gazului, R constanta gazelor perfecte, T temperatura absolută și introducînd în locul produsului $V \cdot \rho$ greutatea moleculară M , a gazului rezultă pentru viteza de propagare a undelor acustice în gaze o nouă relație

$$c = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}}. \quad (3.3)$$

Această relație pune în dependență viteza de propagare și structura moleculară a gazului. Viteza este cu atît mai mare cu cît greutatea moleculară este mai mică. Așa se explică de ce în unele gaze cum ar fi hidrogenul, cu $M=2$, heliul cu $M=4$, undele acustice au viteze mari de propagare. În schimb prin alte gaze precum și în vapori ale substanțelor organice cu greutate moleculară mare, vitezele undelor acustice sînt relativ coborîte. De exemplu, în vapori de benzol la 120°C , $c=219 \text{ m/s}$, iar în n-pentan la 56°C , $c=195 \text{ m/s}$.

În tabela 3.1 sînt indicate pentru cîteva gaze valorile vitezei de propagare a undelor acustice, calculate cu ajutorul relației (3.3) și determinate experimental.

Așa după cum rezultă din relația (3.3) viteza de propagare a undelor acustice variază și cu temperatura gazului, fiind proporțională cu rădăcina pătrată a acesteia. O substanță putîndu-se afla în stări de agregare diferite în raport cu temperatura, este util a examina această problemă în întreaga ei complexitate. Stările de agregare în care se poate găsi o aceeași substanță sînt:

- solidă între 0 absolut și temperatura de topire sau de solidificare;
- lichidă între temperatura de topire și temperatura de fierbere sau de lichefiere;
- gazoasă între temperatura de fierbere și temperatura critică.

Tabela 3.1

Gazul	Numărul atomilor în moleculă	Temperatura [°C]	Viteza undei [m/s]		Frecvența de măsurare [kHz]
			Calculată	Măsurată	
Helium	1	0	969	972	970
Argon	1	0	308	308	970
Oxigen	2	0	316	315	970
Azot	2	0	337	337	970
Hidrogen	2	0	1237	1260	38,6
Oxid de carbon	2	1000	717	726	27,4
Bioxid de carbon	3	30	275	276	92
Bioxid de sulf	3	20	222	224	111
Sulf. de carbon.	3	45	214	215	1000
Aer	—	0	331,6		

Dacă am figura modul de variație al vitezei undelor longitudinale în funcție de temperatură în cuprinsul celor trei stări de agregare menționate mai sus, ar rezulta diagrama din fig. 3.1. Se constată, în primul rând, în punctele caracteristice (punctul de topire și punctul de fierbere) salturi substanțiale ale vitezei.

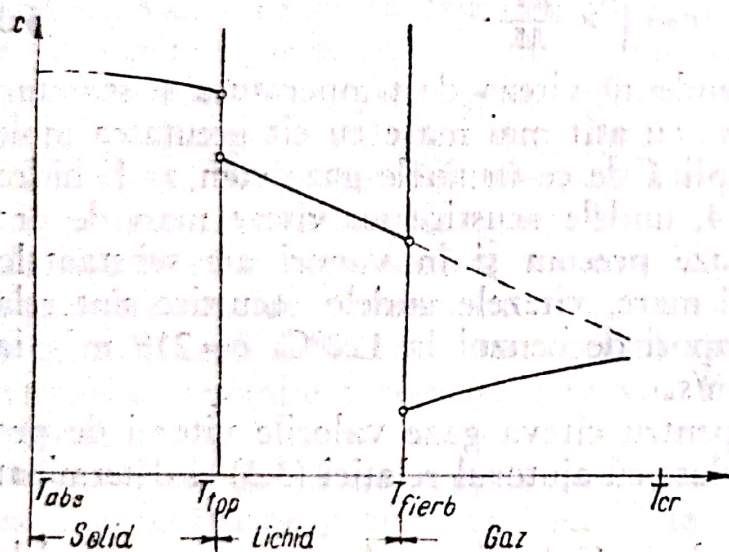


Fig. 3.1. Modul de variație a vitezei undelor longitudinale într-un mediu aflat în diferite stări de agregare.

Între zero absolut și temperatura de topire, deci în propagarea undelor într-un mediu solid, viteza acestora descrește lent. Nu au putut fi efectuate măsurări de viteză pînă la zero absolut, însă Schaffs presupune că în această regiune curba tinde a deveni normală la axa y .

În lichide, viteza de propagare a undelor longitudinale descrește aproximativ liniar pe măsură ce temperatura mediului crește, iar coeficientul unghiular al dreptei are o valoare apreciabilă.

În gaze, viteza de propagare a undelor crește pe măsură ce temperatura mediului crește, curba de variație fiind o parabolă cu concavitatea în jos. Acest mod de variație rezultă clar din relația (3.3).

Dacă se extrapolează curba de variație a vitezei undelor care se propagă într-o substanță în stare lichidă, se constată că ea intersectează, în dreptul temperaturii critice, curba de variație a vitezei undelor în propagarea lor prin aceeași substanță aflată în stare gazoasă. Acest rezultat este explicabil având în vedere că la temperatura critică cele două stări ale substanței nu se deosebesc în această privință.

În tabela 3.2 sînt date pentru cîteva gaze aflate la temperaturi diferite valorile vitezei de propagare a undelor acustice.

Tabela 3.2

Gazul	T °C	c m/s	Frecvența kHz	Gazul	T °C	c m/s	Frecvența kHz
Hidrogen	-67,5	1085	1750	Oxigen	-68,3	274,5	1000
		1079,5	2500			276	2000
	+ 3,6	1249	1750		-26,7	299	1000
		1252	2500			299,5	2000
	+18,9	1270	1750		+18,6	326	1000
		1282	2500			326	2000
Azot	-67,6	294	1500	Aer	-68,3	288	1500
		295	2000			289	2000
	-26,7	319	1500		-26,7	314	1500
		320	2000			314	2000
	+16,9	347	1500		+17,3	342	1500
		347	2000			342	2000

Dacă aerul ar fi considerat un gaz ideal, ale cărui călduri specifice ar fi independente de temperatură și frecvență, atunci viteza de propagare a undelor nu ar depinde de presiune ci numai de temperatură, conform relației

$$c_T = c_0 \sqrt{1 + T/273}. \quad (3.4)$$

Expresia (3.2) care permite calculul vitezei este justă numai atunci cînd propagarea undei acustice se face fără pierderi de energie, pierderi cauzate de vîscozitate, de conductibilitatea termică, de radiația termică sau de alte cauze. Într-un mediu vîscos, viteza undelor se poate calcula cu relația

$$c^2 = c_0^2 + \frac{16 \pi^2 \eta^2}{9 \rho^2 \lambda^2} \quad (3.5)$$

în care c_0 este viteza undelor într-un mediu gazos nedisipativ, η coeficientul de viscozitate, λ lungimea de undă a ultrasunetului.

Din această relație rezultă că viteza variază cu lungimea de undă respectiv cu frecvența. În domeniul frecvențelor audibile, λ fiind mare, al doilea termen din partea dreaptă a relației (3.5) devine neglijabil, viteza de propagare a undelor rămânând practic constantă. În domeniul ultrasunetelor, în special al celor de frecvență ridicată, datorită faptului că λ are valori mici, acest termen nu mai poate fi neglijat, iar viteza devine o funcție de frecvență, crescând pe măsură ce frecvența crește. Cu alte cuvinte, apare fenomenul de dispersie. Dacă se ține seama și de conductibilitatea termică, viteza de propagare a undei este reprezentată de o expresie în care figurează și coeficientul de conductibilitate, expresie în care intră de asemenea lungimea de undă. Deci, și în acest caz viteza devine o funcție de frecvență.

În afară de factorii specificați mai sus, în propagarea undei acustice prin gaze poliatomice mai intervine un nou factor, legat de procesele elementare de repartizare în moleculă a energiei primită de la o altă moleculă sub formă de transfer de energie cinetică. În cazul frecvențelor ultrasonice ridicate, acest fenomen constituie cauza principală a dispersiei în gaze și totodată a unei absorbții anormale, problemă ce va fi tratată într-un paragraf separat. Cercetările în acest domeniu au făcut să se dezvolte o nouă ramură a acusticii, anume *acustica moleculară*.

Se știe că într-o stare dată, o moleculă dispune de mai multe grade de libertate. Molecula putând avea o mișcare de translație și o mișcare de rotație, ea va dispune de trei grade de libertate în translație și de trei grade de libertate în rotație. Dar prin posibilitatea de mișcare a atomilor sau a grupelor de atomi în interiorul moleculei, aceasta poate avea și o mișcare de vibrație. Rezultă deci și un număr de grade de libertate de vibrație, egal cu $3n-6$, în cazul când molecula conține n atomi. Cum vibrația moleculei are loc în urma mișcării atomilor sau grupelor de atomi din interiorul acesteia, gradele de libertate corespunzătoare se mai numesc și grade de libertate interioare. Această denumire s-a dat pentru a le deosebi de gradele de libertate corespunzătoare mișcării moleculei în totalitatea ei (translație și rotație) și care se mai numesc grade de libertate exterioare.

Energia pe care o posedă la un moment dat o moleculă poliatomică se repartizează gradelor de libertate, rezultând o energie de translație, o energie de rotație și o energie de vibrație. Această repartizare este funcție de temperatură și experiența a arătat că ea se efectuează în urma ciocnirilor dintre molecule. Deci dacă prin ciocnire un grup de molecule capătă o anumită cantitate de energie de translație, atunci după un

anumit timp o parte din această energie se transformă în energie de rotație, iar o altă parte în energie de vibrație, pînă ce se stabilește un anumit echilibru dinamic. În consecință, energia totală W a unui gaz în fiecare moment, este egal cu suma celor trei energii, de translație (W_t), de rotație (W_r) și de vibrație (W_v), adică

$$W = W_t + W_r + W_v. \quad (3.6)$$

Cum căldura specifică a gazului la volum constant este $C_v = \frac{\partial W}{\partial \tau}$, rezultă

$$C_v = C_t + C_r + C_v \quad (3.7)$$

unde C_v este căldura specifică a gazului de volum constant iar C_t , C_r și C_v sînt căldurile specifice care se referă la energiile corespunzătoare specificate mai sus.

Ținînd seama de modul de grupare a gradelor de libertate atît energia unui gaz cît și căldura specifică la volum constant se pot separa și ele în două părți și anume în energia W_e , respectiv căldura specifică C_e , care depind de gradele de libertate exterioare și în energia W_i , respectiv căldura specifică C_i , care se referă la gradele de libertate interioare. În acest caz, relațiile (3.6) și (3.7) se mai pot scrie

$$W = W_e + W_i \quad (3.6')$$

$$C_v = C_e + C_i. \quad (3.7')$$

Cînd o undă acustică se propagă printr-un gaz poliatomic ea produce variații de presiune; prin aceste variații ia naștere o energie termică care se distribuie între gradele de libertate menționate mai sus, pînă se stabilește echilibrul termic. Dar stabilirea acestui echilibru necesită un anumit timp. Repartizarea energiei gradelor de libertate exterioare se efectuează în mod rapid, pe cînd distribuția la gradele de libertate interne se face în mod mai lent. Acest fenomen poate fi comparat, de exemplu, cu încărcarea unui condensator electric, proces caracterizat prin ecuația cunoscută

$$E = E_0(1 - e^{-t/RC})$$

care este integrala ecuației diferențiale

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{RC}(E - E_0),$$

în care RC este constanta de timp a condensatorului.

O relație analogă se poate scrie și în cazul procesului termic specificat mai sus și anume

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{\tau} (W - W_0) \quad (3.8)$$

unde τ este o mărime analogă constantei de timp RC , denumită timp de relaxare, definit ca timpul necesar stabilirii unei noi stări de echilibru dinamic.

Fenomenul se numește *relaxare*, prin această denumire punându-se în evidență necesitatea existenței unui anumit timp sau a unei pauze pînă la terminarea procesului.

Energia furnizată de către emițătorul ultrasonic în mediu face ca moleculele să capete o mișcare în direcția de propagare a undei. Acest proces are loc în urma trecerii energiei la gradele de libertate de translație a moleculei și el se efectuează într-un interval de timp foarte scurt ($\tau_{tr} < 10^{-10}$ s). Trecerea energiei mai departe la gradele de libertate de rotație se produce de asemenea foarte rapid, într-un interval de timp de ordinul $\tau_{rot} = 10^{-8}$ s. În fine, trecerea energiei de la gradele de libertate externe (de translație și de rotație la cele interne de vibrație), se produce într-un interval de timp relativ lung. Pentru majoritatea gazelor τ_{vibr} este cuprins între 10^{-3} și 10^{-6} s. Datorită valorilor pe care pot să le aibă timpii de relaxare, de rotație și de vibrație, fenomenul poate fi pus în evidență în banda de frecvență la care pot fi efectuate în mod practic măsurătorile de viteză și de absorbție. De aceea se poate afirma că există doi timpi de relaxare corespunzători la două procese bine definite: relaxare de rotație și relaxare de vibrație.

Dacă presupunem că variația de presiune în unda acustică se produce destul de lent, adică transferul de energie de la gradele de libertate externe la cele interne se efectuează într-un interval de timp mai lung decît timpul de relaxare de vibrație, atunci căldura specifică a gazului intervine în totalitatea sa fiind egală cu $C_V = C_e + C_i$.

Dacă însă durată în care se efectuează o compresiune scade, ca urmare a creșterii frecvenței, transferul de energie gradelor de libertate interioare devine din ce în ce mai mic, iar atunci cînd compresiunea se efectuează într-un timp mai scurt decît timpul de relaxare de vibrație, procesul de repartizare al energiei nu mai poate urma variațiile de presiunea acustice și ca urmare transferul nu se va mai putea face de la gradele de libertate exterioare la cele interioare. În acest caz gazul se comportă ca și cum căldura sa specifică ar fi fost $C_V = C_e$.

Cum căldura specifică sub volum constant este funcție de frecvență și cum din (3.2) se vede că valoarea vitezei de propagare a undelor acus-

tice depinde de căldura specifică a gazului rezultă că la rîndul ei viteza va depinde de frecvența undei, adică va avea loc fenomenul de dispersie.

Pentru un gaz ideal la care

$$\frac{p}{\rho} = RT \text{ și } C_p - C_v = R$$

expresia vitezei de propagare a undelor acustice, dată de (3.2), se mai poate scrie

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho} \left(1 + \frac{R}{C_v}\right)}. \quad (3.9)$$

Din cele arătate mai înainte rezultă că viteza poate varia între două limite, ale căror valori pot fi calculate din relațiile

$$c_0 = \sqrt{\frac{p}{\rho} \left(1 + \frac{R}{C_0}\right)} \text{ pentru } f \rightarrow 0 \quad (3.10)$$

și

$$c_\infty = \sqrt{\frac{p}{\rho} \left(1 + \frac{R}{C_e}\right)} \text{ pentru } f \rightarrow \infty. \quad (3.11)$$

Raportul

$$\varepsilon = \frac{c_\infty^2 - c_0^2}{c_\infty^2} \quad (3.12)$$

se mai numește valoarea de relaxare sau gradul de dispersie și pe cale experimentală s-a găsit a fi în general mai mică decît 0,1.

Atunci cînd o undă ultrasonică traversează un gaz, se produce o variație periodică a temperaturii și a energiei interne exprimată prin relațiile

$$T = T_0 + T_1 e^{j\omega t}$$

$$W = W_0 + C_i T_1 e^{j\omega t}$$

unde $\omega = 2\pi f$, este pulsația vibrației acustice.

Introducînd această ultimă egalitate în ecuația care caracterizează fenomenul de relaxare, relația (3.8), prin integrare se obține o relație pentru W . Din aceasta, ținînd seama că $C_v = \left(\frac{\partial w}{\partial T}\right)_v$, rezultă

$$C_v = C_e + \frac{C_i}{1 + j\omega\tau} = C_e + \frac{C_v - C_e}{1 + j\omega\tau}. \quad (3.13)$$

Introducând pe C_V în expresia (3.9) a vitezei, se obține

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho} \left(1 + \frac{R}{C_e + \frac{C_V - C_e}{1 + j\omega\tau}} \right)}. \quad (3.14)$$

Partea reală a acestei expresii reprezintă valoarea vitezei de propagare a ultrasunetelor

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho} \left(1 + R \frac{C_V + \omega^2\tau^2 C_e}{\tau^2 + \omega^2\tau^2 C_e^2} \right)}. \quad (3.15)$$

Pentru cele două cazuri limită $\omega\tau \ll 1$ și $\omega\tau \gg 1$, adică pentru frecvențe ale undei care tind către zero, respectiv către infinit se regăsesc expresiile (3.10) și 3.11).

În fig. 3.2 este reprezentat modul de variație al vitezei de propagare a undei într-un gaz poliatomic în funcție de frecvență. În abscisă au fost luate valori pentru $\lg f$, iar în ordonată valori ale pătratului vitezei. Se constată că pînă la o anumită frecvență viteza se menține constantă, după care are loc un salt destul de pronunțat urmînd apoi un palier la fel de drept ca și cel din prima parte a diagramei, în regiunea frecvențelor înalte.

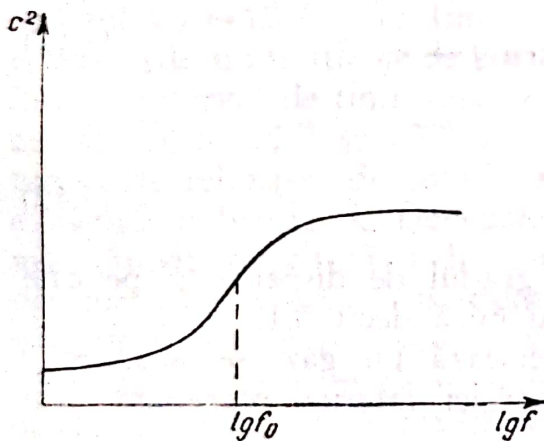


Fig. 3.2. Modul de variație a vitezei undelor longitudinale în funcție de frecvență.

Pentru a determina frecvența, respectiv pulsația la care are loc acest salt, este necesar să se stabilească în primul rînd o relație care să permită calculul acestei mărimi. Din combinarea relațiilor (3.10) și (3.11) cu (3.15) se obține

$$\omega^2 = \frac{1}{\tau} \frac{C_V}{C_e} \sqrt{\frac{c_\infty^2 - c_0^2}{c_\infty^2 - c^2}}. \quad (3.16)$$

Considerînd pulsația medie (ω_m) pentru care pătratul vitezei este media aritmetică a pătratelor celor două viteze extreme, adică

$$c_m^2 = \frac{c_\infty^2 + c_0^2}{2}$$

din relația (3.16) rezultă

$$\omega_m^2 = \frac{1}{\tau} \frac{C_V}{C_e} \approx \frac{1}{\tau}. \quad (3.17)$$

Se constată că pulsația ω_m depinde de timpul de relaxare și cum acesta este o constantă a gazului, rezultă că frecvența de la care se poate considera începutul fenomenului de dispersie diferă de la un gaz la altul în cazul unei temperaturi și presiuni determinate. În plus cu ajutorul relației (3.17) poate fi calculat timpul de relaxare, atunci când pe bază de măsurări se determină frecvența de la care începe să se producă dispersia.

În tabela 3.3. sînt indicate pentru diferite gaze și vapori organici compuși ai metanului, valorile timpului de relaxare de vibrație.

Tabela 3.3

Gazul	Temperatura °C	Timpul de relaxare s	Autorul
Clor	17	$3,40 \cdot 10^{-6}$	Richardson
Brom	17	$1,80 \cdot 10^{-6}$	Richardson
Iod	17	$0,85 \cdot 10^{-6}$	Richardson
CO ₂	17	$6,20 \cdot 10^{-6}$	Kneser
CS ₂	17	$0,42 \cdot 10^{-6}$	Kneser
N ₂ O	17	$1,00 \cdot 10^{-6}$	Kneser
CH ₄	30	$1,07 \cdot 10^{-6}$	A. Eucken și S. Aybar
CH ₃ Cl	30	$1,85 \cdot 10^{-7}$	D. Sette
CH ₂ Cl ₂	30	$9,46 \cdot 10^{-8}$	D. Sette
CCl ₄	30	$2,08 \cdot 10^{-8}$	D. Sette

În cazul oxigenului și azotului relaxarea de vibrație nu există decît la frecvențe foarte joase sau la presiuni și temperaturi foarte ridicate. Timpul de relaxare de vibrație corespunzător celor două gaze pentru presiunea de o atmosferă și temperatura ambiantă este atît de mare, încît metodele acustice obișnuite nu sînt suficiente pentru a permite determinarea în mod direct a frecvenței de relaxare. Folosind o tehnică specială de măsurare, R. Holmes și colab. au reușit să determine în cazul oxigenului cu o puritate de 99,50% frecvența la care se produce relaxarea de vibrație, găsind valoarea de $9 \pm 1,5$ Hz la presiunea de 1 atm.

Mult mai ușor a putut fi pusă în evidență în cazul acestor gaze relaxarea de rotație, atribuită trecerii energiei de translație la gradele de libertate, de rotație, proces care se desfășoară într-un interval de timp mult mai scurt. În urma măsurărilor efectuate Yahei Fujii și colab. au determinat valorile acestui tip de relaxare găsind:

— pentru azot $\tau_{rot} = (7,6 \pm 0,6) 10^{-10}$ s.

— pentru oxigen $\tau_{rot} = (5,1 \pm 0,4) 10^{-10}$ s.

Determinările au fost efectuate în gaze aflate la temperatura de 22°C și la presiunea atmosferică. În fig. 3.3 sînt indicate curbele de variație ale vitezei de propagare a undelor acustice în oxigen și în hidrogen greu în funcție de raportul f/p . Se constată că relaxarea de rotație intervine

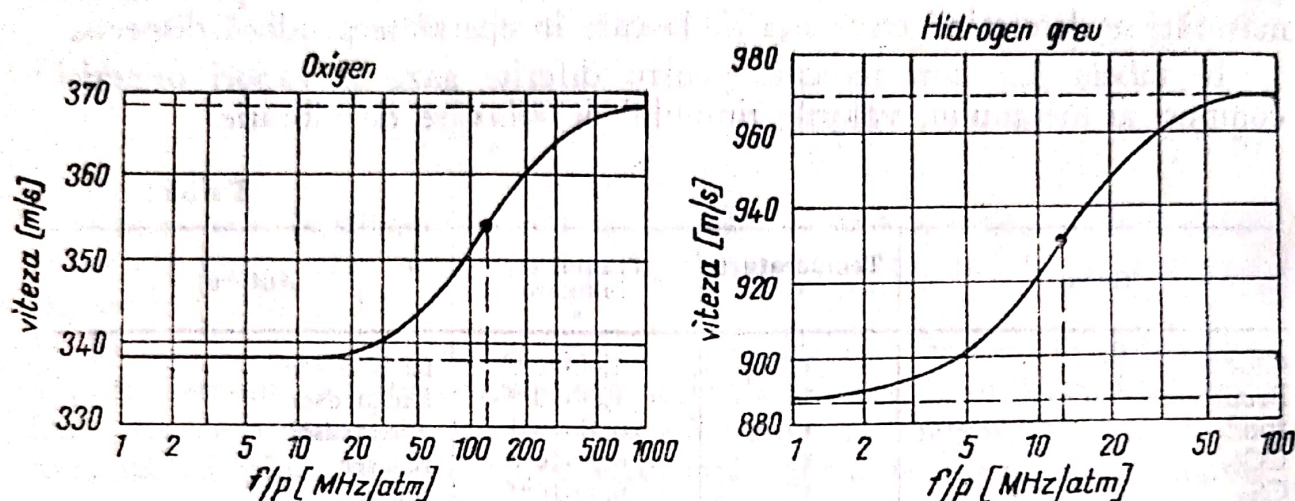


Fig. 3.3. Variația vitezei undelor acustice în funcție de raportul f/p , în oxigen și în hidrogenul greu.

în cazul oxigenului la aproximativ 120 MHz/atm, iar în cazul hidrogenului greu la aproximativ 13 MHz/atm.

Pentru oxidul de carbon au fost efectuate de către diferiți autori măsurări ale vitezei și absorbției, însă există diferențe destul de apreciable între valorile obținute. Determinările cele mai recente arată că există o relaxare de vibrație la o frecvență în jur de 73 Hz la presiunea de 1 atm și la temperatura de 103°C .

3.1.2. Atenuarea undelor acustice în gaze. În § 1.9 s-a arătat că propagarea unei unde acustice într-un mediu este însoțită de o pierdere de energie, caracterizată prin constanta de atenuare. La producerea acestei atenuări într-un gaz concură în cea mai mare măsură absorbția în mediu, datorită faptului că diferitele procese care au loc cu prilejul propagării undei nu sînt reversibile.

Absorbția energiei acustice într-un gaz este datorită mai multor cauze și anume:

- frecării interne între regiunile foarte învecinate din câmpul acustic (efecte de vîscozitate),
- conductibilității termice între regiuni de comprimare și rarefiere;
- radiației căldurii;

- schimbărilor intermoleculare de energie (fenomenul de relaxare);
- fenomenului de rezonanță.

Primele trei cauze (vâscozitate, conductibilitatea termică și radiația căldurii) se consideră cauzele clasice de absorbție datorită faptului că ele au fost examinate încă din secolul trecut de către Kirchhoff și Stokes. Ținând seama de aceste cauze și admitând că nu există o corelație între fenomenele enumerate mai sus, ele avînd loc în mod separat una de alta, constanta de atenuare totală este egală cu suma constantelor corespunzătoare fiecărui proces în parte și anume

$$\alpha = \alpha_{vis} + \alpha_{term} + \alpha_{rad}. \quad (3.18)$$

Atunci cînd straturi ale unui mediu se găsesc în mișcare unele față de altele, forțele de frecare datorite vîscozității se opun acestei mișcări. Acest proces are loc și într-un cîmp acustic, în care caz o parte din energia transportată de undă este absorbită fiind transformată în căldură. Pentru propagarea undelor acustice printr-un gaz, Stokes a stabilit următoarea relație care permite calculul constantei de atenuare respective.

$$\alpha_{vis} = \frac{18}{3} \frac{\pi^2 f^2 \eta}{\rho c^3} \quad (3.19)$$

unde η este coeficientul de vîscozitate.

La propagarea unei unde acustice, anumite regiuni ale mediului sînt comprimate iar temperatura acestora devine mai mare decît temperatura regiunilor învecinate care sînt rarefiate. Din această cauză apare tendința unei conducții a căldurii de la straturile comprimate la cele rarefiate, care are ca rezultat o disipare a unei părți din energia acustică transportată de undă. Kirchhoff a dat următoarea relație pentru constanta de atenuare corespunzătoare conductibilității termice

$$\alpha_{term} = \frac{2 \pi^2 f^2 (\kappa - 1) k}{\rho c^3 C_p} \quad (3.20)$$

unde κ este raportul căldurilor specifice, C_p căldura specifică sub presiune constantă, k coeficientul de conductibilitate termică.

În cazul gazelor, valoarea constantei de atenuare datorită vîscozității este de aproximativ 2—3 ori mai mare decît valoarea constantei de atenuare datorită conductibilității termice.

O dată cu încălzirea straturilor de gaz care sînt comprimate, se produce și o radiație a acestei călduri, fapt care duce la o disipare a unei

părți din energia acustică transportată de undă. Pentru constanta de atenuare corespunzătoare acestui proces, Stokes a dat următoarea expresie

$$\alpha_{rad} = \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right) \frac{q}{2c} \quad (3.21)$$

în care q este coeficientul de răcire a masei gazului, indicat de legea lui Newton

$$T - T_1 = (T_0 - T_1)e^{-qt}$$

unde $(T - T_1)$ este excesul de temperatură la timpul t , iar $(T_0 - T_1)$ excesul de temperatură la timpul zero.

În cazul proceselor liniare, valoarea constantei de atenuare datorită radiației căldurii este foarte mică și în practică se poate neglija. Numai în cazul undelor de intensități foarte mari sau a undelor de șoc, când sînt generate temperaturi relativ înalte, pierderea de energie acustică prin radiație devine mai importantă și trebuie să se țină în seamă și de valoarea constantei de atenuare respective.

Examinînd relațiile (3.19) și (3.20) se constată că constantele de atenuare sînt proporționale cu patratul frecvenței undei acustice. Rezultă deci că în conformitate cu teoria vîscotermică, pe baza căreia au fost stabilite expresiile celor două constante de atenuare, raportul

$$\alpha' = \frac{\alpha}{f^2} = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\kappa - 1}{C_p} k \right) \quad (3.22)$$

nu depinde de frecvență, însă pentru un gaz dat, depinde de natura acestuia, de presiunea, temperatura etc. ale acestui gaz.

Experiența a arătat însă că relația (3.22) se verifică numai în puține cazuri și anume numai în cazul gazelor monoatomice. Pentru gazele poliatomice valorile constantelor de atenuare determinate în urma măsurătorilor erau cu mult mai mari decît cele calculate cu ajutorul relațiilor stabilite de Stokes și de Kirchhoff, pe baza teoriei clasice. În plus, α/f^2 nu mai reprezintă o valoare constantă, ci scade cu frecvența, pe măsură ce numărul atomilor în moleculă și greutatea acestora cresc. Acest lucru reiese clar din tabela 3.4.

Explicația acestor rezultate experimentale, puse în evidență în domeniul frecvențelor ultrasonice și care reprezintă abateri importante de la datele obținute pe baza teoriei vîscotermice, a fost găsită în urma studierii proceselor intermoleculare.

Pentru a explica modul în care se produce această absorbție anomală în cazul unui gaz poliatomic, să considerăm o porțiune din mediu aflat

Tabela 3.4

Gazul	Numărul atomilor în moleculă	$\alpha / f^3 \cdot 10^3$ (clasice) [s ² /cm]			$\frac{\alpha}{f^3} \cdot 10^3$ măsurat s ² /cm	Frecvența MHz
		visc.	term.	total		
Argon	1	1,08	0,77	1,85	1,90 1,90	3,0 4,25
Oxigen	2	1,16	0,49	1,65	1,68 3,20	0,6 1,2
Azot	2	0,94	0,39	1,33	1,35 2,00	0,6 3,0
Hidrogen	2	0,117	0,052	0,169	3,58 3,70	0,6 4,0
Bioxid de carbon	3	1,09	0,31	1,40	27,10 5,00	0,3 1,0
Bioxid de sulf	3	1,10	0,27	1,37	42,0	1,4
Benzen	12	—	—	1,20	525,0 37,0	0,1 0,46
Cloroform	5	—	—	3,35	365,0 23,0	0,1 0,46

Într-un câmp acustic și să examinăm procesul în timpul unei singure perioade. Inițial gazul se găsea la presiunea p_1 , volumul considerat fiind V_1 . În prima jumătate de perioadă, elementul de volum capătă o compresie rapidă de la p_1 la p_2 ($p_2 > p_1$), iar volumul scade de la V_1 la V_2 . În această semiperioadă molecula capătă o anumită cantitate de energie care se transmite mai întâi gradelor de libertate exterioară și apoi în intervalul timpului de relaxare de vibrație gradelor de libertate interioară. În a doua jumătate de perioadă, pe timpul destinderii sau rarefierii gazului, volumul V_2 revine la volumul inițial V_1 . De această dată energia totală acumulată de moleculă în semiperioada anterioară, constituită din energia gradelor exterioare și energia gradelor interioare, este retrocedată unde acustice.

În desfășurarea acestui proces pot interveni mai multe situații.

a) Dacă durata dintre două comprimări sau două rarefierii succesive este mult mai mare decât timpul de relaxare de vibrație, atunci echilibrul dinamic se poate stabili și întreaga energie primită de gradele de libertate este cedată practic integral unde. Rezultă că nu are loc o pierdere de energie acustică care să poată fi pusă în evidență, deci nu apare o

absorbție suplimentară. Aceasta se întâmplă în cazul frecvențelor joase, din domeniul audibil.

b) Dacă durată dintre două comprimări sau două rarefieri succesive este comparabilă sau ceva mai mică decât timpul de relaxare de vibrație, atunci echilibrul dinamic numai poate fi restabilit. În acest caz, o fracțiune din energia transferată gradelor de libertate interioară este reținută de molecule, fiind astfel pierdută din punct de vedere acustic. Aceasta se întâmplă în cazul frecvențelor ultrasonice.

c) Dacă durată dintre două comprimări sau două rarefieri succesive este cu mult mai mică decât timpul de relaxare de vibrație, atunci posibilitatea de a se transfera o parte din energia gradelor interioare, devine foarte redusă, așa încât acestea în mod practic nu mai pot prelua nici o cantitate de energie. Ca urmare nu se va produce nici o pierdere de energie acustică detectabilă. Aceasta se întâmplă la frecvențe ultrasonice ridicate.

Din cele de mai sus rezultă că absorbția datorită fenomenului de relaxare variază cu frecvența prezentând un maxim la o anumită frecvență caracteristică fiecărui gaz în parte aflat la presiunea atmosferică. Pe baza teoriei dezvoltate de Kneser, se poate deduce expresia constantei de atenuare pe lungimea de undă ($\alpha^* = \alpha\lambda$), obținându-se

$$\alpha^* = \varepsilon\pi \frac{\omega\tau}{1 + (1 - \varepsilon)\omega^2\tau^2} \quad (3.23)$$

unde ε este valoarea de relaxare dată de expresia (3.12).

Curba de variație a constantei de atenuare are forma unui clopot (fig. 3.4), iar valoarea maximă egală cu

$$\alpha_{max}^* = \frac{\pi}{2} \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \varepsilon}} = \frac{\pi}{2} \frac{c_\infty^2 - c_0^2}{c_0 c_\infty} \quad (3.24)$$

are loc pentru

$$\omega_M = \frac{1}{\tau\sqrt{1 - \varepsilon}} = \frac{c_0}{c_\infty} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (3.25)$$

Pe baza relațiilor (3.17) și (3.25), se poate stabili o relație între pulsația medie (ω_m) corespunzătoare mijlocul pantei de creștere a vitezei de propagare a undei și (ω_M), pulsație la care se produce absorbția maximă, anume

$$\omega_M = \frac{c_0}{c_\alpha} \cdot \omega_m \quad (3.26)$$

Cum c_0 este puțin diferită de c_∞ , rezultă că maximum de absorbție are loc într-un domeniu de frecvență apropiat de cel în care se produce dispersia. Datorită faptului că $c_\infty > c_0$ rezultă că $\omega_M < \omega_m$, cu alte cuvinte maximum de absorbție are loc la o frecvență ceva mai coborâtă decât frecvența corespunzătoare punctului mediu al curbei de dispersie. De exemplu în cazul gazelor biatomice (oxigen, azot) raportul c_∞/c_0 este egal aproximativ cu 1,1, astfel încât și $\omega_m \approx 1,1 \omega_M$.

În urma măsurărilor interferometrice a vitezei și absorbției undei acustice în gaze, s-a constatat că timpul de relaxare este invers proporțional cu presiunea. Explicația acestui fapt este următoarea: într-un gaz real între două ciocniri, moleculele au o deplasare rectilinie. La o temperatură dată, viteza medie a moleculei este constantă și prin urmare și durata τ_c între două ciocniri este constantă. Dacă se mărește însă presiunea, volumul gazului se micșorează, ceea ce face ca parcursul liber mijlociu al moleculei să se micșoreze, deci și τ_c să se micșoreze. Așadar, τ_c variază invers proporțional cu presiunea gazului. Cum însă timpul de relaxare este proporțional cu timpul mediu dintre două ciocniri rezultă că și el va fi invers proporțional cu presiunea. Ținând seama de relația (3.17), se poate afirma că frecvența de relaxare devine proporțională cu presiunea, cu alte cuvinte la o frecvență dată o micșorare a presiunii gazului are asupra procesului de relaxare o aceeași acțiune ca și mărirea frecvenței atunci când se păstrează constantă presiunea. Rezultă că dispersia și absorbția datorite procesului de relaxare sînt funcții nu numai de frecvență, ci și de presiune; așadar, sînt funcție de raportul dintre frecvență și presiunea gazului. Din acest motiv pentru trasarea curbelor absorbției și dispersiei în mod obișnuit se alege în abscisă valori ale raportului f/p sau $\lg f/p$.

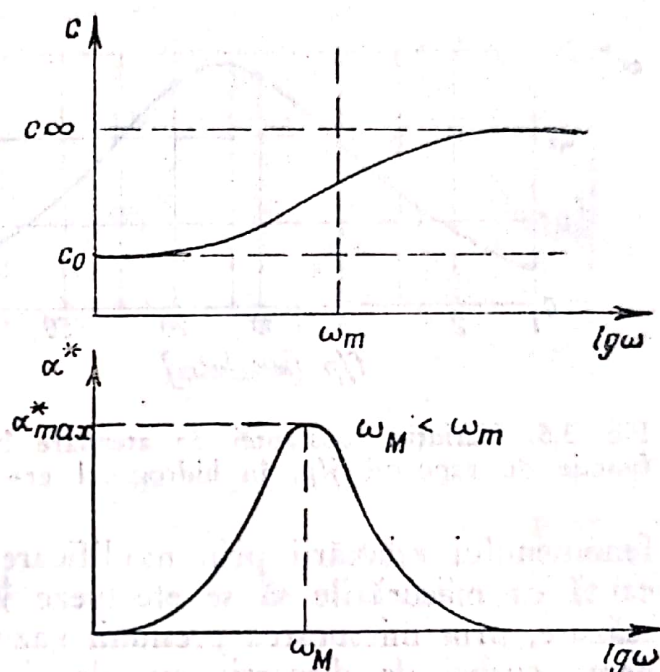


Fig. 3.4. Corelarea variației cu frecvența a vitezei și a constantei de atenuare a undelor acustice.

În fig. 3.5 este reprezentată curba de variație a constantei de atenuare pe lungimea de undă în funcție de raportul f/p în cazul hidrogenului greu. Măsurările efectuate de J. Stewart au fost obținute cu ajutorul unui interferometru la frecvența de 1,95 MHz, presiunea gazului variind între 2,5 și 760 mmHg. Pentru timpul de relaxare s-a găsit valoarea $0,02 \cdot 10^{-6}$ s.

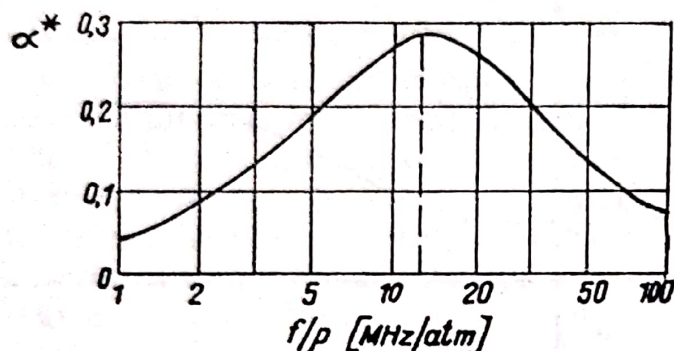


Fig. 3.5. Variația constantei de atenuare în funcție de raportul f/p , în hidrogenul greu.

Dacă f_{1rel} și f_{2rel} sînt două frecvențe de relaxare corespunzătoare la două presiuni p_1 și p_2 la care este supus gazul, atunci se poate scrie

$$\frac{f_{1rel}}{p_1} = \frac{f_{2rel}}{p_2} = \text{const.} \quad (3.26')$$

Din examinarea relației (3.26') se constată că este posibil să se schimbe domeniul frecvențelor în care se produce dispersia și absorbția datorită

fenomenului relaxării prin modificarea presiunii gazului. În general se caută ca măsurările să se efectueze într-un domeniu de frecvențe mai scăzute, prin micșorarea presiunii gazului. Acest fapt face posibilă obținerea curbei de dispersie sau de absorbție fără schimbarea frecvenței numai printr-o simplă variație a presiunii la care se supune gazul.

Măsurările de absorbție efectuate în gaze aflate la temperaturi diferite au arătat că constanta de atenuare variază și cu temperatura, maximum de absorbție avînd valori cu atît mai mari cu cît temperatura gazului este mai ridicată. În fig. 3.6 sînt reprezentate curbele de variație ale constantei de atenuare specifice (constanta de atenuare lungimea de undă) în funcție de raportul f/p , pentru diferite temperaturi în cazul unui gaz biatomic (clorul) și a unui gaz triatomic (bioxidul de carbon). Măsurările au fost executate de F. D. Schields.

În afară de relaxare, un alt fenomen care contribuie la creierea unei absorbții suplimentare a energiei acustice este rezonanța. După cum se știe, acest fenomen apare atunci cînd un sistem are elemente care pot vibra și atunci cînd amortizarea vibrațiilor nu este prea mare. În cazul de față, elementele care pot vibra sînt moleculele gazului aflate într-un cîmp acustic. Atunci cînd frecvența ultrasunetului coincide cu frecvența proprie de vibrație a moleculei, o parte din energia acustică se consumă pentru a mări amplitudinea vibrațiilor moleculelor, producîndu-se în felul acesta o absorbție suplimentară. Cum frecvența proprie de vibrație a

moleculelor unui gaz este foarte ridicată, absorbția datorită fenomenului de rezonanță, nu intervine decât în cazul ultrasunetelor de frecvență foarte ridicată sau a hipersunetelor.

Dispersia și absorbția anomală a sunetului în gaze fiind dependente de structura moleculară a materiei, rezultă că studiul acestor două feno-

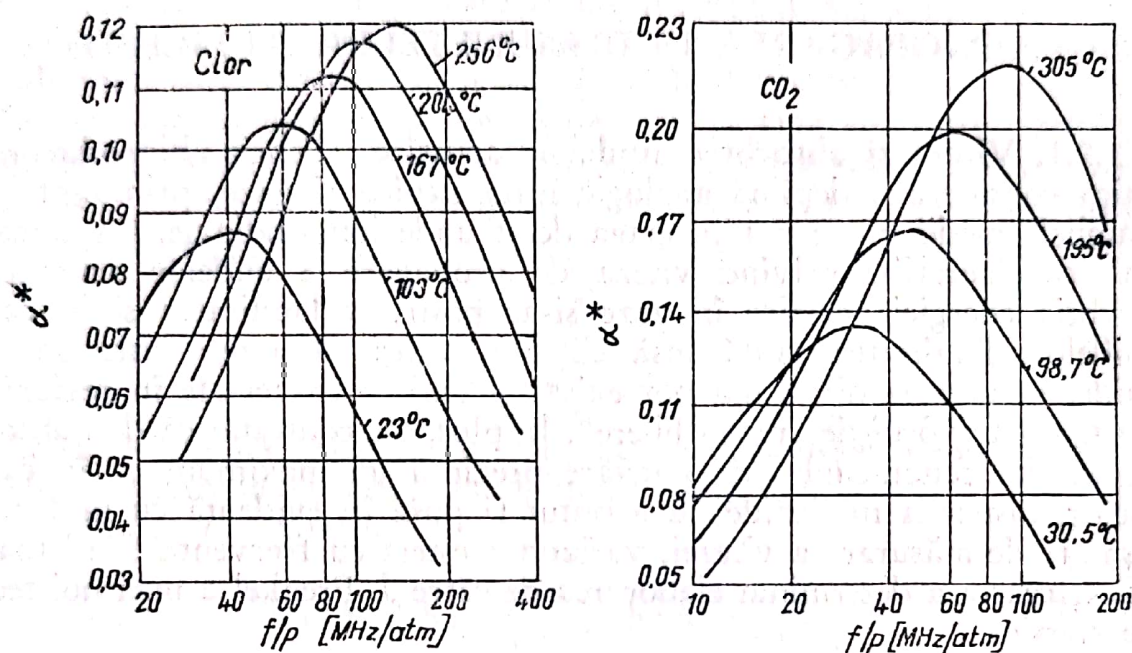


Fig. 3.6. Variația constantei de atenuare în funcție de raportul f/p , în clor și în bioxidul de carbon.

mene permite cercetarea proceselor elementare ce se petrec în gaze la ciocniri între molecule. În chimie, o substanță se caracterizează în mod obișnuit prin greutatea sa moleculară și prin densitate, în condițiile presiunii atmosferice. Dar caracterizarea unei substanțe, în speță a unui gaz, se poate face și cu ajutorul vitezei de propagare a undei acustice, definită de relația (3.1) sau (3.2). Aceste definiții arată o dependență strânsă a vitezei de presiunea și de densitatea gazului. În consecință, ecuația de stare se poate prezenta în afară de forma cunoscută $f(p, \rho, T)=0$ și sub una din formele indicate mai jos

$$f(c, \rho, T)=0; f(c, p, T)=0; f(c, \alpha, \rho)=0. \quad (3.27)$$

De multe ori este avantajos să se studieze un gaz folosindu-se una din aceste relații.

Prin punerea în evidență a dispersiei și absorbției undelor acustice în gaze poliatomice se poate determina probabilitatea de excitare a mișcării

de vibrație a moleculelor în urma ciocnirilor ce se produc între ele, se poate stabili numărul nivelelor de vibrații existente într-o moleculă dată și se poate stabili viața medie a unei vibrații în moleculă, precum și alte fenomene care au loc în gaze.

3.2. PROPAGAREA ULTRASUNETELOR ÎN LICHIDE

3.2.1. Viteza și absorbția undelor acustice. Teoria hidrodinamică clasică consideră o deplină analogie între lichide și gaze, prin faptul că în ambele medii nu se pot propaga decât unde longitudinale. Ca urmare, toate considerațiile privind viteza de propagare a undelor acustice și absorbția energiei acustice în gaze și-ar păstra valabilitatea și în cazul lichidelor. Realitatea arată însă că sînt totuși diferențe între gaze și lichide. În acestea din urmă pot exista și unde transversale în regiuni în care se poate vorbi de „medii libere”. În plus, s-a constatat că deși absorbția datorită fenomenului de relaxare prezintă un maximum ca în cazul gazelor, dispersia în lichide nu a putut fi pusă în evidență cu mijloacele obișnuite de măsurare a vitezei, variația acesteia cu frecvența fiind foarte mică. Aceasta a determinat elaborarea de către J. Frenkel a unei noi teorii viscoelastice.

Datorită faptului că asupra unui lichid se poate aplica atît un efort de compresiune, cît și un efort de tăiere, avînd în vedere vîscozitatea acestuia, teoria consideră lichidul mai apropiat de starea solidă decît de un gaz. În acest caz el este caracterizat prin doi parametri mecanici: un modul de compresiune K și un modul de tăiere G . Ambii parametri vor intra în expresiile vitezei și constantei de atenuare a unei acustice. Datorită analogiei dintre un lichid și starea solidă, J. Frenkel admite că atomii sau moleculele într-un lichid vibrează în jurul pozițiilor de echilibru așa cum se întîmplă și într-un corp solid, cu toate că pozițiile de echilibru nu sînt permanente, în sensul că pe timpul unui mare număr de oscilații atomul sau molecula pot acumula suficientă energie, de a trece într-o poziție de echilibru alăturată. Pentru a efectua saltul, molecula trebuie să aibă energia necesară învingerii barierii de potențial datorită particulelor înconjurătoare. Fiecare atom sau moleculă are nevoie să se oprească un timp mediu τ într-o aceeași poziție pentru a acumula energia cerută. Atunci cînd asupra sistemului nu este aplicată nici o forță, atomii și moleculele efectuează salturi în toate direcțiile și nu este observată nici o scurgere macroscopică.

Un sistem se va comporta diferit în raport cu durata de acționare a forței. Astfel dacă această durată este mult mai mică decât timpul mediu τ de rămânere a particulei într-o poziție, mediul se comportă ca un solid elastic; dacă însă durata de acționare a forței este mai mare decât timpul τ , acțiunea forței face ca saltul atomilor sau moleculelor să fie mai lesnicios în direcția în care se aplică forța și se produce o scurgere. Din acest punct de vedere este evident că sistemul posedă proprietățile atât ale unui solid elastic, cât și ale unui fluid vâcos.

Într-un mediu viscoelastic se poate face o separare între partea de compresiune datorită efortului p , cu deformarea respectivă s și partea de tăiere datorită efortului p_{ij} , cu deformarea respectivă s_{ij} . Între eforturi și deformații există relațiile

$$\begin{aligned} p &= -Ks \\ p_{ij} &= Gs_{ij} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Aceste relații sînt valabile în stare statică. Dacă însă asupra lichidului se aplică o presiune variabilă, modulul de compresiune devine o cantitate complexă dată de expresia

$$K = K_0 + K_1 \frac{\omega^2 \tau_v^2}{1 + \omega^2 \tau_v^2} + j K_1 \frac{\omega \tau_v}{1 + \omega^2 \tau_v^2}, \quad (3.29)$$

în care K_0 este modulul de compresiune static și K_1 modulul rotațional care intervine în procesul de relaxare, fiind funcție de timpul de relaxare sub volum constant (τ_v) și de viscozitatea de volum (η_v), anume:

$$K_1 = \frac{\tau_v}{\tau_v}. \quad (3.30)$$

La frecvențe foarte joase $K = K_0$, în timp ce la frecvențe foarte înalte $K_\infty = K_0 + K_1$.

În același caz, al aplicării unui efort alternativ, modulul de tăiere devine și el o cantitate complexă dată de relația

$$G = G \frac{\omega^2 \tau_s^2}{1 + \omega^2 \tau_s^2} + j G \frac{\omega \tau_s}{1 + \omega^2 \tau_s^2}, \quad (3.31)$$

în care τ_s este timpul de relaxare, funcție de viscozitatea de tăiere (η) și de modulul de tăiere (G), anume

$$\tau_s = \frac{\eta}{G}. \quad (3.32)$$

În general, $\tau_s \neq \tau_v$. Totuși în cazul lichidelor cu o viscozitate ridicată, prin faptul că procesul care face să apară modulul rotațional este strâns legat de procesul scurgerii, se poate lua $\tau_s = \tau_v = \tau$.

Cunoscând expresiile modulului de compresiune și a modulului de tăiere, se poate calcula viteza de propagare a undei acustice și constanta de atenuare prin lichid. În cazul undelor longitudinale, viteza de propagare c_v a undei acustice într-un mediu viscoelastic, la care K și G sînt diferite de zero, este dată de relația

$$c_v^2 = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}. \quad (3.33)$$

Pe de altă parte

$$-\frac{1}{c_v^2} = \left(\frac{1}{c} - j \frac{\alpha}{\omega} \right)^2$$

și dacă presupunem că $\frac{\omega^2}{c^2} \gg \alpha^2$, se poate scrie

$$c_v^2 = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho} = c^2 + j2\alpha \frac{c^2}{\omega}. \quad (3.34)$$

Introducînd în relațiile de mai sus în locul lui K și G expresiile date de (3.29) și (3.31) și egalînd părțile reale între ele și părțile imaginare între ele, se pot obține expresiile vitezei și a constantei de atenuare:

$$c^2 = \frac{1}{\rho} \left[K_0 + \left(K_1 + \frac{4}{3}G \right) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right], \quad (3.35)$$

$$\alpha = \frac{1}{2\rho c^3} \left(K_1 + \frac{4}{3}G \right) \frac{\omega^3 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (3.36)$$

În banda frecvențelor joase, expresia vitezei devine

$$c_0 = \sqrt{\frac{K_0}{\rho}} \quad (3.37)$$

relație cunoscută care permite calculul vitezei de propagare a undelor acustice printr-un mediu lichid. La frecvențe foarte înalte, expresia (3.35) se simplifică de asemenea devenind

$$c_\infty = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K_0 + K_1 + \frac{4}{3}G \right)}. \quad (3.38)$$

Datorită faptului că în cazul lichidelor mai puțin vîscoase K_1 și G au valori reduse, diferența dintre c_∞ și c_0 este foarte mică, valoarea vitezei

variind foarte puțin cu frecvența. O dispersie mai pronunțată se constată la lichidele cu viscozitate ridicată. În tabela 3.5 sînt date valorile corespunzătoare lui c_0 și c_∞ pentru diferite lichide.

Tabela 3.5

Lichidul	Temperatura °C	c_0 m/s	c_∞ m/s	$\frac{c_\infty - c_0}{c_0}$	Autorul
Apă	25	1492	1509	0,011	Venketeswaran
Benzen	20	1324	1470	0,11	Fabelinski
Toluen	20	1324	1348	0,018	Fabelinski
Acetonă	20	1190	1190	0	Fabelinski
Glicerină	25	1960	2500	0,27	Venketeswaran
Glicerol	-14	1990	3150	0,59	Piccinelli
Difenil pentaclorid.	34,5	1310	1690	0,29	Litovitz

Viteza de propagare a undei acustice într-un lichid depinde și de temperatură, în sensul că viteza descrește pe măsură ce temperatura lichidului crește, fenomen pus în evidență prin măsurări în cazul tuturor lichidelor experimentate cu excepția apei. În cazul oxigenului lichid și a azotului lichid $\Delta c/\Delta T$ are valoarea egală cu 9,0 m/s, respectiv 8,3 m/s, iar la lichidele organice $\Delta c/\Delta T$ variază între 2 și 5 m/s, pentru o modificare a temperaturii cu un grad.

Valorile vitezei corespunzătoare unor lichide organice sînt indicate în tabela 3.6.

Tabela 3.6

Lichidul	Temperatura °C	Viteza m/s	Lichidul	Temperatura °C	Viteza m/s
Benzen	10	1375	Clorobenzen	10	1322,5
	20	1324		20	1284,5
	30	1278		30	1248
	40	1231		40	1212
	50	1184		50	1178
Toluen	10	1370,5	Alcooletilic	10	1154
	20	1327,5		20	1121
	30	1284,5		30	1088
	40	1242		40	1056
	50	1199		50	1023,5

Apa este un mediu în care variația cu temperatura a vitezei de propagare a undei acustice este diferită decît în celelalte lichide studiate din acest punct de vedere. Cercetările experimentale au pus în evidență exis-

stența unui maximum al vitezei de propagare a undelor la temperatura de 74°C când compresibilitatea are valoarea minimă. O asemenea dependență anormală a vitezei în raport cu temperatura este pusă în legătură cu unele particularități ale structurii apei. În prezent se admite că acest lichid reprezintă un amestec de două structuri distincte: prima o structură similară cu cea a dispunerii moleculelor în gheață și o a doua structură corespunzând moleculelor strâns îngrămădite.

Variația temperaturii apei face să se modifice concentrația ultimei structuri și în același timp să varieze și depărtarea medie dintre molecule. Astfel atunci când temperatura crește concentrația celei de-a doua struc-

turi se mărește și în același timp distanța medie dintre molecule crește. Dacă în primul caz coeficientul de temperatură a compresibilității are o valoare negativă, în cazul al doilea acest coeficient are o valoare pozitivă. Prezența simultană a celor două tendințe opuse duce la existența unei valori minime a compresibilității, care are ca rezultat existența unui maxim al vitezei de propagare a undelor acustice. O schimbare a structurii apei cauzată de creșterea presiunii sau de prezența ionilor face ca poziția maximumului vitezei să se deplaseze și în același timp să se modifice și valoarea acestui maxim.

La temperatură constantă, viteza de propagare a unei variază cu presiunea exercitată asupra fluidului, în sensul că la presiuni mici, până la aproximativ 500 atm viteza crește liniar cu presiunea. La presiuni mai mari se constată

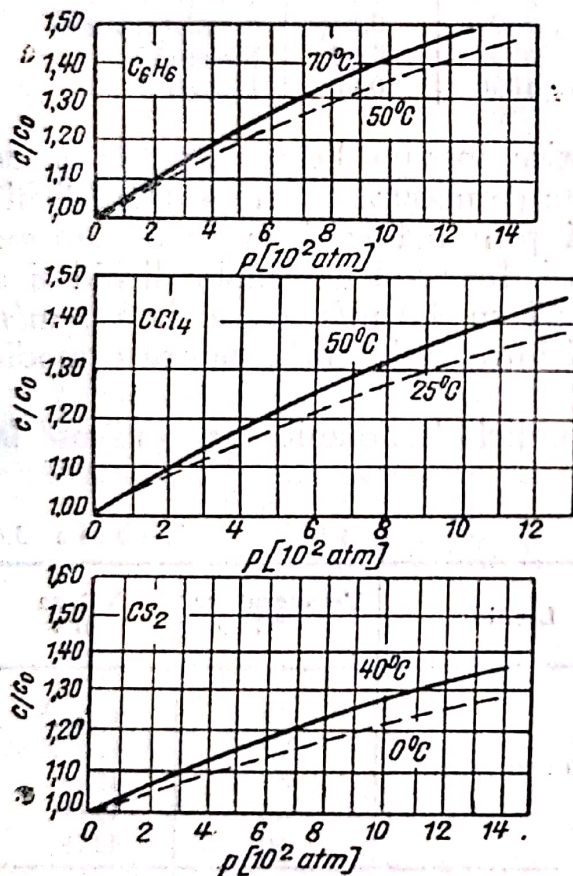


Fig. 3.7. Viteza relativă a ultrasunetelor în benzen, tetraclorură de carbon și bisulfură de carbon în funcție de presiune, la diferite temperaturi.

o saturare, viteza tinzând către o valoare limită, în domeniul presiunilor mai mari de 10 000 atm. În fig. 3.7 sînt indicate pe baza măsurărilor efectuate de Mifsud și Nolle curbele de variație ale vitezei de propa-

gare a undelor acustice în funcție de presiune în cazul a trei lichide: benzen, tetraclorură de carbon și bisulfură de carbon. Determinările au fost efectuate la diferite temperaturi.

Absorbția în mediu se caracterizează prin constanta de atenuare dată de relația (3.36). În cazul frecvențelor joase ($\omega\tau \ll 1$), expresia se simplifică devenind

$$\alpha = -\frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3}G + K_1 \right)^2 \tau. \quad (3.39)$$

Ținând seama de relațiile (3.30) și (3.32) considerînd ca mai sus $\tau_v = \tau_s$, expresia (3.39) se mai poate scrie

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3}\eta' + \eta_v \right). \quad (3.40)$$

Se constată că ea este echivalentă cu expresia (3.19) rezultată din teoria hidrodinamică a lui Stokes, cu singura diferență că s-a introdus un nou termen corespunzător viscozității de volum (η_v) rezultat din aplicarea teoriei viscoelastice. Cum determinarea lui η_v nu poate fi făcută prin măsurări statice ci numai prin măsurarea lui α , rezultă că aplicarea relației (3.40) nu conduce la soluționarea problemei. De aceea în practică pentru calculul constantei de atenuare se folosește expresia (3.19) avînd în vedere că în cazul fluidelor contribuția conductibilității termice asupra atenuării undelor este lipsită de importanță.

În domeniul frecvențelor înalte, constanta de atenuare specifică ($\alpha^* = \alpha\lambda$) trece printr-un maxim pentru

$$\omega\tau = 1, \text{ de unde } \omega = 1/\tau.$$

Cum în cazul lichidelor timpul de relaxare este mult mai mic decît în cazul gazelor, rezultă că pulsația, respectiv frecvența pentru care se produce maximum de absorbție sînt foarte ridicate. Astfel raportul $\tau_{\text{gaz}}/\tau_{\text{lic}}$ este egal cu 180 în cazul benzenului, cu 260 în cazul sulfurii de carbon și cu 105 în cazul cloroformului.

Dacă luăm în considerare apa, căruia îi corespunde $\tau = 6 \cdot 10^{-10}$ s, rezultă că valoarea frecvenței pentru care absorbția devine maximă este egală cu 270 MHz, iar pentru benzen această valoare devine 530 MHz. Datorită acestor valori ridicate ale frecvenței, care pentru lichide se situează în general în banda 10^8 — 10^{10} Hz, se consideră că în cazul acestor medii α/f^2 nu variază cu frecvența, fiind o cantitate constantă. Într-adevăr Lamb cercetînd atenuarea undelor ultrasonice în benzen pînă

la o frecvență de 250 MHz a constatat că α/f^2 rămâne constant pînă la 90 MHz, observînd o ușoară descreștere la frecvențe mai ridicate.

Diferența dintre valorile lui α/f^2 calculate conform teoriei clasice și valorile obținute prin măsurători depinde de structura lichidului, iar pentru un anumit lichid ele variază cu temperatura, așa după cum rezultă din tabela 3.7.

Tabela 3.7

Lichidul	Temperatura °C	$\alpha_{calc}/f^2 \cdot 10^{17}$ s ² /cm	$\alpha_{m\ddot{a}s}/f^2 \cdot 10^{17}$ s ² /cm	$\frac{\alpha_{m\ddot{a}s}}{\alpha_{calc}}$
Argon	-188	10,5	10,1	0,96
Oxigen	-186	7,3	8,6	1,18
	-203	6,7	8,6	1,28
	-213	8,3	8,6	1,03
Azot	-199	9,5	10,6	1,12
Hidrogen	-256	5,8	5,6	0,97
Apă	0	17,1	59,6	3,33
	20	8,2	25,3	3,10
	40	4,85	14,6	3,01
Alcool metilic	2	15,0	45,0	3,00
	19,3	14,0	37,0	2,64
	-50	68,4	137,0	2,00
Alcool etilic	-10	35,2	67,6	1,92
	10	27,4	55,9	2,04
	50	19,8	44,0	2,27
Tetraclorură de carbon	20	20,0	500,0	25,0
Benzen	20	6,9	850,0	123,2

Pornind de la diferențele care există între valorile raportului $\alpha_{m\ddot{a}s}/\alpha_{calc}$ corespunzător diferitelor lichide, I. Pinkerton, a căutat să stabilească o clasificare a lichidelor. În prima grupă ar intra lichidele monoatomice ca heliul, argonul, la care raportul $\alpha_{m\ddot{a}s}/\alpha_{calc}$ este aproximativ egal cu 1. Propagîndu-se în aceste lichide denumite și „normale” unde acustice suferă absorbția clasică. În grupa a doua sînt incluse lichidele asociate ca diferitele alcooluri, glicerina, anilina etc. la care forțele intermoleculare sînt relativ mari, ele pîrînd să aibe o structură asemănătoare cu cea solidă și la care coeficientul de temperatură este negativ. În acest caz raportul $\alpha_{m\ddot{a}s}/\alpha_{calc}$ are valori cuprinse între 1—3. În grupa a treia, caracterizată prin valori mari ale raportului $\alpha_{m\ddot{a}s}/\alpha_{calc}$, intră lichidele care posedă forțe intermoleculare slabe ca benzenul și sulfura de carbon, tetraclorura de carbon, cloroformul etc. La lichidele din această grupă coeficientul de temperatură este pozitiv. În fig. 3.8 sînt indicate curbele de variație a constantei de atenuare în funcție de temperatură la un

lichid din grupa a doua, respectiv alcool metilic (după Nordsrev) și la un lichid din grupa a treia, respectiv benzen (după Sette).

Rezultatele teoretice și cele experimentale arătate mai sus sînt valabile în cazul undelor ultrasonice de amplitudine mică. Dacă însă într-un lichid se propagă ultrasunete de amplitudine finită, așa după cum a constatat prima dată Fox și Wallace, constanta de atenuare capătă valori mai mari decît în cazul propagării printr-un acelaș lichid a ultrasunetelor de intensități mici. Astfel în apă constanta $2\alpha/f^2$ se mărește de cinci ori la 10 MHz iar în tetraclorură de carbon la 5 MHz se mărește de două ori, atunci cînd intensitatea acustică crește de la valori infime la valori mari de aproximativ 5 W/cm². Efectuînd determinări în apă, în glicerină și în soluții ale acidului acetic, Towle și Lindsay au constatat că constanta de atenuare crește linear cu presiunea acustică. Acest lucru se poate observa în diagrama din fig. 3.9, unde este redată variația cu presiunea acustică a constantei α/f^2 în cazul propagării în apă a undelor ultrasonice de diferite frecvențe. Cu cît frecvența ultrasunetului este mai

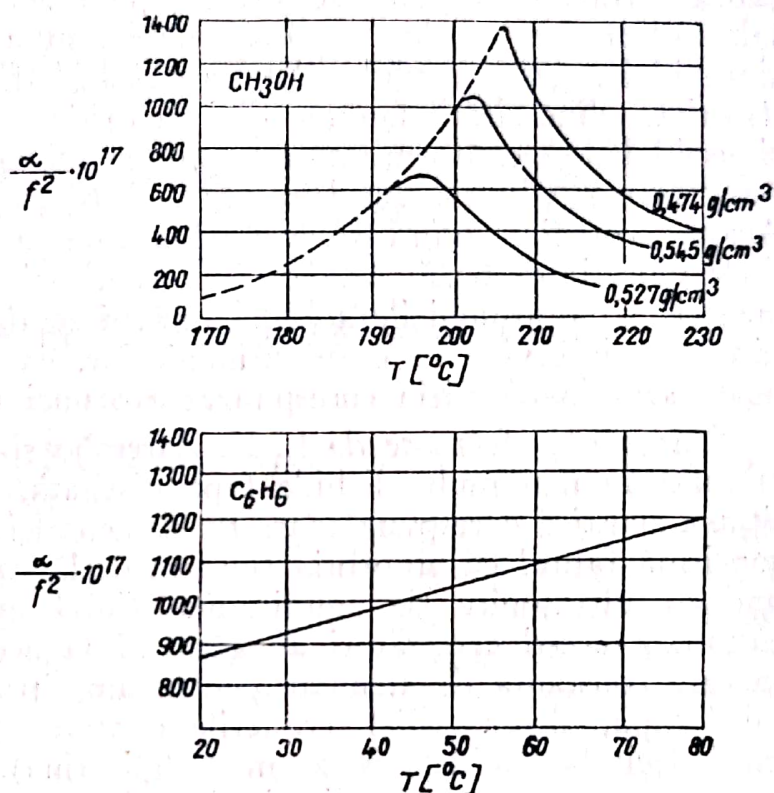


Fig. 3.8. Variația constantei de atenuare în funcție de temperatură în alcool metilic și în benzen.

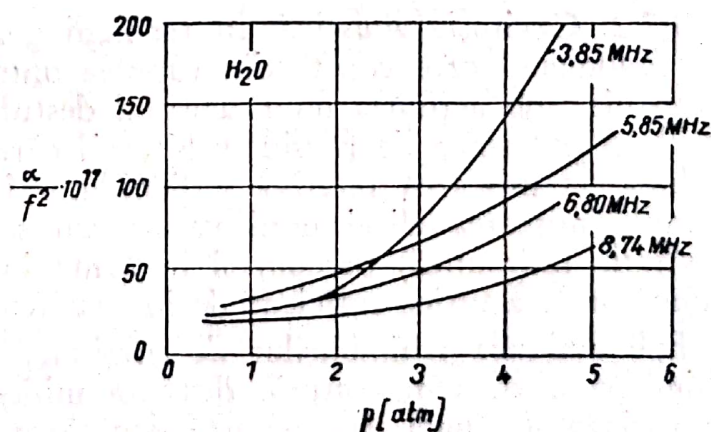


Fig. 3.9. Variația constantei de atenuare în funcție de presiunea acustică în apă.

mică, cu atât se manifestă o variație mai accentuată a absorbției cu intensitatea acustică.

Acest proces de creșterea absorbției în cazul undelor acustice de amplitudine finită nu este datorit fenomenului de cavitație ci provine din cauza formei unde. Într-adevăr relația (3.40) ca și valorile experimentale indicate în tabela 3.6 sînt valabile numai în cazul unei unde pur sinusoidale. Însă o undă de amplitudine finită străbătînd un lichid, datorită nelinearității fenomenului în mediu, nu își mai păstrează forma sinusoidală. În conformitate cu teorema lui Fourier, ea poate fi descompusă într-o vibrație fundamentală și o serie de armonici superioare. Aceste armonice avînd frecvențe ridicate suferă o atenuare mai mare decît vibrația de bază. Așadar, energia acustică repartizîndu-se pe fundamentală și pe armonicile acesteia rezultă că datorită atenuării mai puternice care intervine în cazul armonicilor, ea suferă în ansamblu o atenuare superioară celeia corespunzătoare unei unde pur sinusoidale.

Cercetările efectuate de L. K. Zarembo și V. A. Krasilnikov care au măsurat în mai multe lichide (apă distilată, alcool etilic, toluol) intensitatea acustică corespunzătoare fundamentalei și primelor două armonici, confirmă faptul că absorbția fundamentală care intervine în propagarea undelor ultrasonice de amplitudine finită este datorită formei unde. Totodată acești cercetători au găsit că la aceleași intensități, la lichide la care constanta de atenuare pentru amplitudini infinitezimale (α_0) este mică (apă, alcool etilic), creșterile relative ale acestei mărimi sînt mai mari decît la lichidele cu α_0 mare (glicerină).

Acest proces are implicație în tehnică. Datorită creșterii atenuării la undele de amplitudine, finită, în practică este greu să se obțină ultrasunete de intensități ridicate la depărtări prea mari de emițător.

3.2.2. Cavitația acustică. În termeni generali prin cavitație se înțelege fenomenul care constă din ruperea unui lichid și refacerea imediată a acestuia, sub acțiunea unor tensiuni destul de mari sau a unor variații rapide și puternice de presiune. Situații care pot da naștere cavitației se întîlnesc la mișcarea relativă a lichidului în raport cu un obstacol, de exemplu mișcarea elicei unui vapor sau scurgerea lichidului prin duze (cavitația hidrolică) precum și în urma introducerii în masa lichidului a unor unde acustice suficient de intense (cavitația acustică).

Sub acțiunea schimbărilor de presiune, întocmai ca și sub influența schimbărilor de temperatură, distanța mijlocie dintre particulele mediului variază și atunci cînd această depărtare atinge o anumită valoare, se produce o ruptură a lichidului. Aceasta se întîmplă în momentul în care presiunea acustică este negativă și anulează presiunea corespunzătoare

forțelor de coeziune dintre particulele lichidului. Ruperea de ordin microscopic a mediului este urmată în acele locuri de apariția unor goluri sau cavități. Ruptura nu se produce simultan în toată masa lichidului ci în punctele de slabă rezistență, provocată de neomogenitate, numită germen de cavitație sau nucleu. De exemplu, un asemenea germen poate

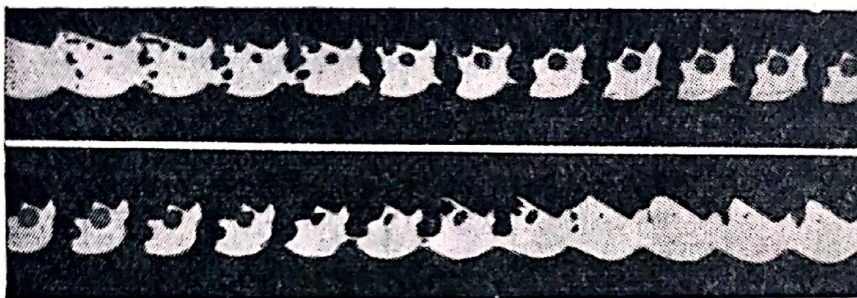


Fig. 3.10. Fazele succesive ale unei bule de cavitate.

fi gazul dizolvat în lichid. Experiențe efectuate cu ajutorul concentratoarelor ultrasonice puternice au arătat că fenomenul de cavitație nu apare numai decât în focarul concentratorului, adică acolo unde se manifestă presiunea acustică maximă, ci și în vecinătatea focarului, dacă în acel loc se află un germen. Deci prezența în masa lichidului a neomogenităților sau microbulelor este condiția de producere a cavității acustice, la valori ale presiunii acustice mai mici decât rezistența la întindere a lichidului.

Comportarea bulelor de cavitație după ce s-a produs ruptura lichidului a putut fi urmărită prin examinarea imaginilor acestora obținute prin fotografiere ultrarapidă. În fig. 3.10 sînt reprezentate fazele succesive ale unei bule de cavitație stabilite prin fotografiere cu o viteză de 400 000 imagini pe secundă. Fenomenul a fost obținut cu unde acustice avînd frecvența de 10 KHz. Sub acțiunea acestor unde bula de cavitație, într-o primă fază, își mărește volumul prin umplerea cu gazul sau aerul care se găsea în locul respectiv în momentul formării ei sau cu vaporii rezultați prin evaporarea ce se produce la suprafața interioară a peretelui. În primul caz are loc așa numita cavitație gazoasă, iar în celălalt caz cavitația de vaporii sau cavitația pură.

Bula se dezvoltă pînă la o anumită mărime, care la o presiune hidrostatică dată depinde de durata dezvoltării bulii și de frecvența ultrasunetului. Timpul necesar bulei de cavitație sferică de rază inițială R_0 să ajungă la un volum de rază R este dat de relația

$$t = \sqrt{\frac{3}{2} \rho R_0^3} \int_{\alpha}^1 \frac{d\alpha}{\alpha^2 \sqrt{(1-\alpha)[-(\alpha^2 + \alpha)(PR_0 + 3\sigma) - PR_0]}} \quad (3.41)$$

în care ρ este densitatea lichidului, σ tensiunea superficială a lichidului, P presiunea hidrostatică și α raportul razelor ($\alpha = R_0/R$).

După dilatarea relativ lentă pe care o are bula de cavitație, ea suferă o comprimare bruscă, distrugându-se. În cursul acestui proces gazul sau vaporii aflați în interiorul bulei se comprimă în mod adiabatic, temperatura putînd ajunge pînă la aproximativ 10 000°C. Durata necesară contractării bulei de cavitație de la un volum cu rază maximă (R_m) la un volum cu raza R se poate calcula cu relația

$$\tau = R_m \sqrt{\frac{3\rho}{2P}} \int_{\beta}^1 \frac{\beta'^{1/2} d\beta'}{\sqrt{(1-\beta') \left[\beta'^2 + (\beta'+1) \left(1 + \frac{3\sigma}{PR_m} \right) \right]}} \quad (3.42)$$

în care β este raportul razelor ($\beta = R/R_m$).

Timpul de închidere a bulei de cavitație sau implozia este inferior timpului dezvoltării acesteia, lucru pus în evidență și din imaginile din fig. 3.9. Rayleigh a calculat timpul τ în cazul particular al închiderii complete a bulei ($\beta=0$) găsiind $\tau = 0,915 R_m \sqrt{\rho/P}$, valoare care concordă destul de bine cu datele obținute pe cale experimentală.

Ca urmare a distrugerii bulei de cavitație se formează o undă de șoc a cărei intensitate este determinată mai cu seamă de mărimea razei maxime pe care o avea bula înainte de procesul de implozie. Cum la o frecvență dată a ultrasunetului raza maximă a bulei depinde de presiunea acustică, rezultă că intensitatea undei de șoc va crește pe măsură ce crește valoarea presiunii acustice. Conform ipotezei emisă de Noltink și Neppiras, confirmată experimental de către Sirotiuk, această corelație este justă atîta timp cît durata necesară închiderii bulei de cavitație este inferioară unei semiperioade a undei ultrasonice, adică atîta timp cît este îndeplinită condiția

$$\tau \leq \frac{T}{2} \quad (3.43)$$

Întotdeauna închiderea bulei începe imediat după ce a avut loc maximum de presiune acustică și se efectuează complet pentru $2\tau/T=1$. Mărind presiunea acustică, în ciuda creșterii razei maxime a bulei, intensitatea undei de șoc începe să descrească datorită faptului că bula nu va reuși să se închidă complet în momentul în care apare semiperioada negativă a undei ultrasonice.

Din relația (3.43) mai reiese că există o limitare a intensității undei de șoc și din partea frecvenței, atunci cînd presiunea acustică este menținută constantă. Pe măsură ce frecvența crește, semiperioada ajunge să

devină mai mică decât durata de distrugere a bulei de cavitație în care caz nu se va produce de asemenea o închidere totală a bulei. De exemplu, în apă la o presiune hidrostatică de 1 atm, considerînd $R_m = 10^{-3}$ cm, rezultă $\tau = 0,915 \cdot 10^{-6}$ s, de unde $T = 1,83 \cdot 10^{-6}$, iar frecvența la care implozia bulei se face complet este de 546 KHz. În general pentru a se obține presiuni de șoc cît mai mari este necesar ca pe măsură ce frecvența undelor ultrasonice crește, valoarea razei maxime a bulei să fie cît mai mare, deci presiunea acustică să crească.

Presiunea maximă corespunzătoare undei de șoc, la o distanță $r = 1,587 R$ de centrul bulei, se poate calcula cu ajutorul relației

$$P_{max} = \frac{P}{4\pi^2} \left(\frac{R_m}{R} \right)^3. \quad (3.44)$$

Unda de șoc generată ca urmare a imploziei bulei de cavitație a fost studiată de o serie de autori după fotografiile obținute. În fig. 3.11 este reprodusă fotografia tipică a unei asemenea unde de șoc luată la lumina unei scînteii. Presiunea undei de șoc poate atinge valoarea de 10^6 atm, aceasta depinzînd de raportul celor două raze. Prin intermediul lui R_m ea este funcție de presiunea acustică și de frecvență; cu cît jumătatea de perioadă a ultrasunetului este mai mare, cu atît bula are posibilitatea să se dilate mai mult. Deci presiuni mai mari ale undei de șoc pot fi obținute mai ușor cu ultrasunete de frecvențe coborîte decît prin folosirea celor de frecvență înaltă.

În cele de mai sus a fost examinată comportarea unei bule de cavitație care după dilatare suferă o comprimare bruscă. Aceasta corespunde evident unei stări de instabilitate a bulei. Mai există și o stare stabilă a bulelor, în care caz acestea își măresc continuu volumul și sub acțiunea cîmpului ultrasonic ele încep să pulseze. Pentru amplitudini mici ale pulsațiilor bulei de cavitație, cînd amplitudinea presiunii acustice este mult mai mică decît presiunea hidrostatică, bula are o mișcare oscilatorie, armo-

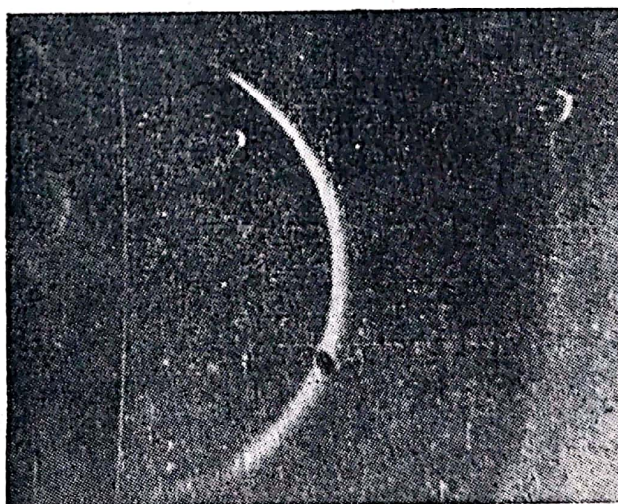


Fig. 3.11. Imaginea undei de șoc produsă prin implozia bulei de cavitație.

nică iar frecvența de rezonanță corespunzătoare se poate calcula cu expresia indicată de Minnaert.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\kappa}{\rho} \left(P + \frac{2\sigma}{R_0} \right)}, \quad (3.45)$$

în care R_0 este raza inițială a bulei de cavitație, κ raportul căldurilor specifice corespunzătoare gazului existent în interiorul bulei de cavitație și σ tensiunea superficială a lichidului.

Cum în mod obișnuit $2\sigma/R_0 \ll P$, acest termen poate fi neglijat și în cazul unei bulei cu aer existentă în interiorul unui lichid la care $P=1$ atm, relația (3.45) se simplifică devenind

$$f_0 = 0,328/R_0$$

f_0 fiind exprimat în kilohertzi, iar R_0 în centimetrii.

Dacă frecvența ultrasunetului este mai mică decât frecvența de rezonanță, bula de cavitație se va găsi în stare instabilă în care caz se produce dilatarea și apoi distrugerea completă a acesteia. Dacă însă frecvența ultrasunetului este superioară frecvenței de rezonanță implozia bulei nu se mai produce, ea căpătînd o mișcare oscilatorie complexă. În acest caz volumul bulei crește continuu, ceea ce ar putea constitui una din cauzele degazării lichidului sub acțiunea unui câmp acustic.

Caracteristica cea mai importantă a procesului de degazare, o constituie viteza medie de degajare a unui gaz dintr-un lichid, definită ca raportul dintre cantitatea de gaz eliberat din unitatea de volum al lichidului și intervalul de timp considerat. Cercetările efectuate de O. Kapustina au arătat că viteza de degajare a gazului crește sensibil în perioada apariției fenomenului de cavitație. Prelungindu-se, însă, durata iradierii cu ultrasunete a lichidului, se constată că, în prezența cavitației, creșterea acestei viteze nu mai este tot atît de importantă. În acest caz degazarea se produce într-un ritm mai lent.

Din examinarea relației (3.45) rezultă că fenomenul de cavitație nu se mai produce atunci cînd se acționează cu un ultrasunet a cărui frecvență depășește o anumită limită superioară. Cunoscînd că raza inițială a bulei este în medie de 10^{-4} cm, frecvența limită ar fi în jur de 3,3 MHz. După W. Gaertner, la intensități obișnuite ale undelor ultrasonice nu pot fi obținute decât efecte slabe ale fenomenului de cavitație la frecvențe mai mari de 2 MHz. În general cu cît frecvența ultrasunetului este mai mare, cu atît sînt necesare intensități mai mari ale ultrasunetului pentru ca fenomenul de cavitație să poată avea loc.

În fig. 3.12 sînt date curbele extreme de variație cu frecvența a presiunii acustice stabilite de Esche care delimitează domeniul apariției fenomenului de cavitație, indicîndu-se datele furnizate de diverși autori care au studiat experimental acest fenomen. Din figură se observă dispersia mare a valorilor obținute experimental. Aceasta se datorește faptului că pentru o frecvență determinată presiunea acustică limită necesară producerii cavitației depinde de o serie de factori care se referă fie la natura lichidului, fie la condițiile în care a avut loc experimentarea (vîscozitatea lichidului, puritatea lichidului și cantitatea de gaze conținută în el, mărimea presiunii hidrostatice, temperatura lichidului etc.).

S-a arătat că ruperea lichidului sub acțiunea unui cîmp acustic intens are loc în punctele de slabă rezistență a lichidului, acolo unde există un germen cavitațional, o microbulă capabilă să se dezvolte ulterior. Pînă în prezent nu s-a putut da o explicație precisă cu privire la condițiile existenței unui asemenea germen și a originii acestuia. Există însă cîteva ipoteze referitoare la mecanismul formării germenilor de cavitație în masa unui lichid.

Conform unei asemenea ipoteze, fluctuațiile calorice care au loc în interiorul lichidului pot da naștere unor mici bule umplute cu vapori a căror presiune echilibrează presiunea exterioară.

Cum un lichid poate conține gaze dizolvante în masa sa, se mai admite ca germen de cavitație existența unor bule cu gaz de dimensiuni mici avînd o rază inferioară valorii 10^{-4} cm. Gazul conținut în bulă este împiedicat să se difuzeze în masa lichidului, datorită unui strat monomolecular care se formează la suprafața bulei și care constituie un perete al acestuia. Dacă înainte de aplicarea cîmpului acustic lichidul a fost degazat, cavitația se produce — cu greutate. Totuși faptul că

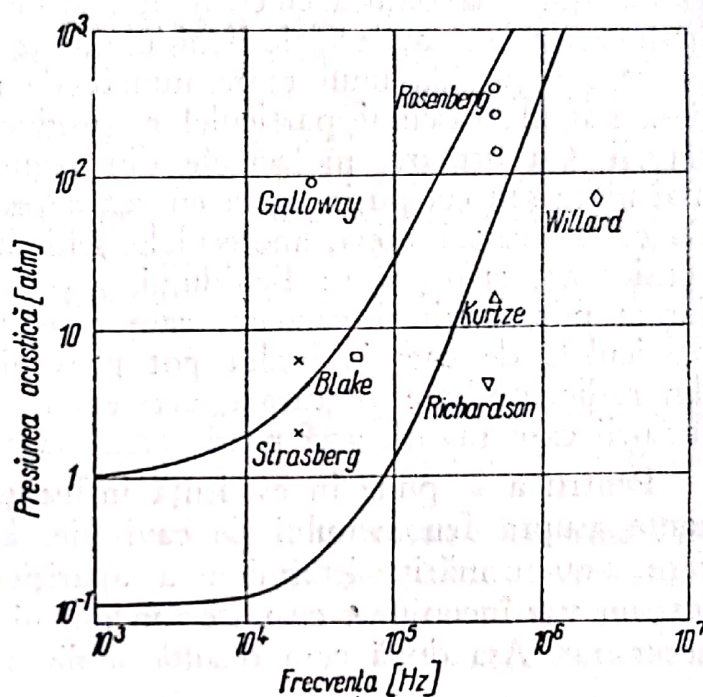


Fig. 3.12. Variația cu frecvența a presiunii acustice care definește pragul cavitației.

fenomenul are loc și în acest caz, a determinat continuarea cercetărilor pentru precizarea originii nucleelor cavitaționale.

În urma studiilor experimentale efectuate de D. Sette a rezultat că radiațiile ionizate pot induce germeni cavitaționali în sistemele lichide, aproape de temperatura critică a acestora. După Seitz, procesul formării germenilor s-ar datora ciocnirii dintre electronii produși de particule de înaltă energie și moleculele lichidului. Electronii transferă energia cinetică pe care o posedă unui mare număr de molecule situate într-o regiune de-a lungul traseului particulelor, producând astfel o creștere a temperaturii. Ca urmare, moleculele din regiunea iradiată posedă o energie mai mare sau cel puțin egală cu cea corespunzătoare temperaturii critice. Datorită acestui efect, moleculele schimbându-și starea nu mai pot fi considerate ca o parte a lichidului, și prin îngrămădiri în grupuri ele pot forma microcavități gazoase, care constituie nuclee cavitaționale. Cum particulele de energie înaltă pot proveni și din radiațiile cosmice sau din radioactivitatea naturală, acestea sînt considerate în prezent printre factorii care favorizează producerea cavitației.

Pentru a se pune în evidență influența pe care o au radiațiile ionizante asupra fenomenului de cavitație, au fost executate experiențe la care s-au urmărit determinarea apariției cavitației în apa conținută într-un vas înconjurat cu un ecran din plumb și în altă situație cu vasul necranat. Așa după cum rezultă și din fig. 3.13 introducerea ecranului

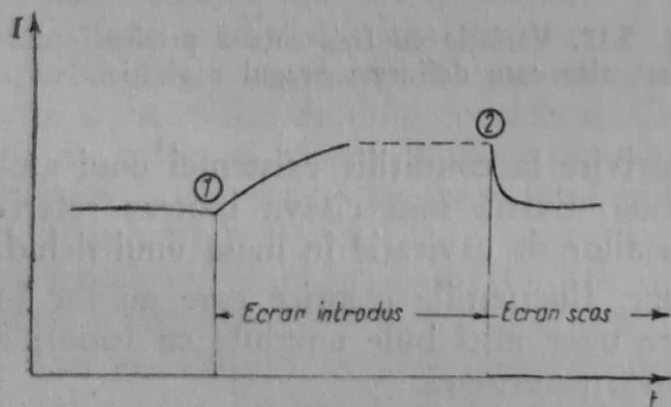


Fig. 3.13. Influența izolării mediului lichid de radiațiile ionizante asupra pragului cavitației

(momentul 1) are ca efect o ridicare a pragului cavitației, în timp ce înlăturarea ecranului (momentul 2) face ca pragul cavitației să revină la valoarea sa inițială.

Acțiunea pe care o au particulele solide în masa lichidului, precum și iradierea acestuia cu particule radioactive asupra micșorării rezistenței lichidului împotriva cavitației, a dus la producerea artificială a nucleelor, prin introducerea de particule solide în masa li-

chidului și prin aplicarea unor radiații ionizante. În felul acesta, producerea cavitației, necesară în numeroase procese tehnologice, este mult ușurată, nefiind necesare intensități prea mari ale câmpului acustic.

Într-un lichid cavitația poate fi produsă prin acțiunea undelor acustice care se manifestă în mod variat: sub formă de fascicul paralel sau focalizat, sub forma unei emisii continue sau sub formă de impulsuri, sub forma unui câmp acustic constituit din unde progresive sau din unde staționare. Ca urmare apar diferențe în modul de dezvoltare a procesului în timp și spațiu precum și diferențe în aspectul său general. De exemplu prin utilizarea emițătoarelor ultrasonice obișnuite, nefocalizante, intensitatea acustică maximă se găsește în dreptul suprafeței radiatorului, astfel încât cavitația apare în zona imediat învecinată acestei suprafețe și va fi afectată atât de caracteristicile lichidului, cât și de cele ale mediului din care este constituit emițătorul. În plus, efectele mecanice care însoțesc fenomenul de cavitație se manifestă la suprafața radiatorului acustic. În cazul sistemelor focalizante cavitația se produce în zona focalului, astfel încât fenomenul este influențat numai de natura și starea lichidului simplu.

Producerea cavitației acustice într-un lichid cauzează o serie de efecte de natură mecanică, acustică, optică, chimică și biologică. În cele ce urmează vor fi examinate aceste efecte.

Efecte mecanice. Presiunile locale mari care iau naștere în urma imploziilor bulelor de cavitație și care pot atinge 10^6 atm. produc eroziunea suprafeței unui corp solid imersat. La această acțiune contribuie și temperatura ridicată generată de contracția bulelor de cavitație la suprafața dintre lichid și corpul solid. Eroziunea datorită cavitației poate fi pusă în evidență prin pierderea greutateii corpului în urma eliminării unei cantități din masa acestuia.

Gradul de erodare a unui material depinde de mai mulți factori printre care se numără intensitatea undei de șoc, natura și temperatura lichidului, natura gazului dizolvat în lichid, durata aplicării câmpului acustic, frecvența și presiunea acustică.

Eroziunea fiind cauzată de șocurile produse în urma distrugerii bulelor de cavitație, este normal ca ea să depindă de intensitatea undelor de șoc. A. S. Bebcuik și colaboratorii au găsit că în cazul aluminiului cantitatea de metal pierdut crește cu pătratul presiunii undei de șoc.

Modul în care acțiunea de eroziune depinde de natura lichidului a fost pus în evidență de A. S. Bebcuik și L. D. Rosenberg. Pentru fiecare lichid în parte există un maximum al efectului la o temperatură determinată (fig. 3.14). În apă, maximum corespunde unei temperaturi în jur de 50°C , pierderea de greutate datorită eroziunii aluminiului fiind de patru ori mai mare decât la 20°C . Mărimea absolută a eroziunii este considerabil mai mare în apă în comparație cu cea produsă atunci când

corpul se găsește cufundat în alte lichide (petrol lampant, benzină, alcool, acetonă).

Spre deosebire de luminiscenta și de reacțiile chimice produse în urma cavitației, care descresc continuu cu creșterea temperaturii, eroziunea

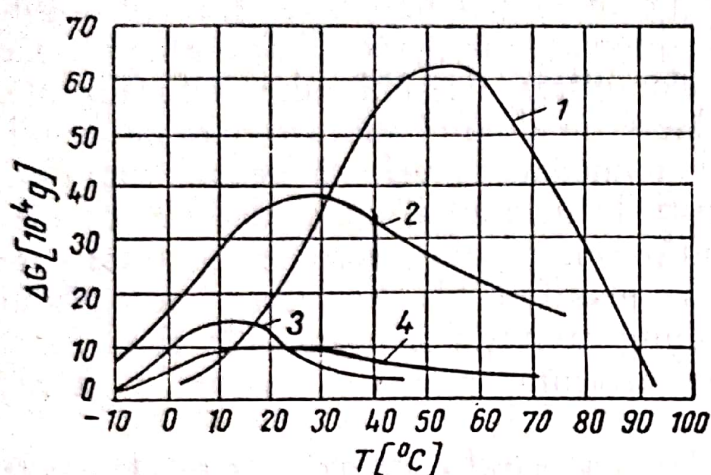


Fig. 3.14. Dependența eroziunii ultrasonice de temperatură și de natura lichidului:

1 — apă; 2 — petrol lampant; 3 — benzină; 4 — alcool.

prezintă la început o creștere și apoi o descreștere în funcție de creșterea temperaturii.

Faptul că eroziunea crește o dată cu creșterea temperaturii lichidului se explică prin mărirea numărului de germeni cavitaționali. Scăderea eroziunii dincolo de o anumită valoare a temperaturii își găsește explicația în intervenirea unei amortizări a undei de șoc produsă prin implozia bulei.

Vaporii de lichid și gazele

dizolvate în acesta reușesc să difuzeze în interiorul bulei odată cu creșterea temperaturii elasticitatea vaporilor și a gazelor se mărește făcând să apară o presiune care se exercită asupra pereților interiori ai bulei și se opune presiunii care se exercită din exterior care tinde să închidă bula de cavitație. În felul acesta forța undei de șoc se micșorează considerabil și ca urmare scade și eroziunea totală a corpului imersat.

În fig. 3.15 este arătată corelația dintre gradul de eroziune în apă (indicatoarele albe) și în alcool etilic (indicatoarele negre), în care au fost dizolvate gaze ca oxigen, azot și bioxid de carbon. Se observă rolul solubilității gazului într-un lichid dat, ceea ce explică și faptul că în apă eroziunea metalului sub acțiunea undelor acustice este mai mare decât în alte lichide, în special în solvenți organici.

Majoritatea cercetărilor cu privire la acțiunea de eroziune datorită cavitației au fost făcute luându-se în considerare piese metalice. Acest efect se manifestă, însă, și în cazul altor materiale. Astfel, s-a constatat o eroziune pronunțată a suprafeței sticlei introduse într-o baie de mercur supusă acțiunii ultrasunetelor de intensități superioare pragului cavitației.

Efectele mecanice produse de cavitația acustică sînt analoge celor datorite cavitației hidraulice. Cavitația acustică prezintă însă un interes mai mare prin faptul că acțiunea ei mecanică poate fi dirijată. Efectele pot fi produse în locuri dorite și în dozele necesare. Aceasta a permis

folosirea fenomenului de cavitație acustică în executarea diferitelor operații tehnologice bazate pe efectele mecanice pe care ea le produce (perforarea, curățirea pieselor, placarea metalelor etc.).

Efecte acustice. Producerea cavitației este însoțită de un zgomot perceptibil chiar cu urechea liberă. Introducerea unui hidrofon în lichidul

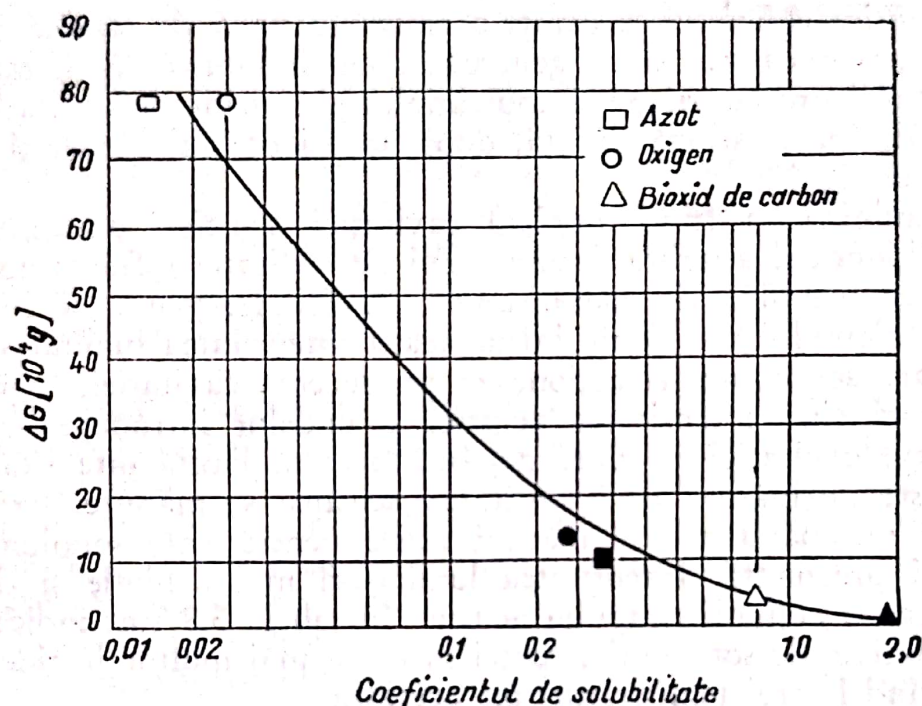


Fig. 3.15. Dependența eroziunii ultrasonice de gradul de solubilitate a unor gaze în apă (semnele albe) și în alcool (semnele negre).

ultrasonat a permis să se determine intensitatea acustică a zgomotului și să se pună în evidență spectrul de frecvență corespunzător. Cu acest prilej s-a constatat prezența unui zgomot alb de bază și a unei serii de componente bine definite, corespunzătoare frecvenței excitatoare a armoniilor acesteia, precum și a unor subarmonici. Așadar zgomotul care ia naștere este datorit, pe de o parte, radiației emițătorului ultrasonic, iar pe de altă parte sunetului generat în momentul spargerii bruște a bulelor de cavitație. Deosebit de intensă este prima subarmonică a ultrasunetului emis. Măsurătorile efectuate de E. A. Neppiras într-o instalație de curățire cu ultrasunete, având frecvența de 40 KHz, au arătat că intensitatea maximă a zgomotului produs a atins 118 dB peste pragul de audibilitate, valoare foarte apropiată de limita senzației dureroase. Generarea

unui zgömot atît de intens implică fie capsularea instalației pentru atenuarea zgomotului, fie folosirea de ultrasunete de frecvențe mai ridicate, astfel încît prima subarmonică să nu intre în spectrul audibil. Totodată, prin efectele acustice pe care le produce cavitația, poate fi pus în evidență și studiat cîmpul acustic din interiorul unui lichid.

Sonoluminiscentă. Fenomenul de cavitație într-un lichid face să apară și efecte optice concretizate printr-o emisiune slabă de lumină denumită, ținînd seama de cauza care o generează, sonoluminiscentă. Lumina emisă este rezultatul producerii pe timpul imploziei bulelor de cavitație a unor iluminări de foarte scurtă durată, după aprecierile lui Meyer și Kuttruff mai mică de 10^{-8} s.

Sonoluminiscentă fiind asociată cavitației acustice, parametrii fizici care condiționează apariția fenomenului de cavitație influențează și producerea fenomenului de luminiscentă. Astfel frecvența și intensitatea acustică a cîmpului ultrasonic influențează intensitatea luminoasă în măsura în care acești factori acționează producerea cavitației. Luminiscentă apare atunci cînd intensitatea acustică a undelor introduse în lichid a atins pragul cavitației și odată depășită această limită intensitatea luminoasă crește pe măsură ce intensitatea acustică se mărește. Există chiar o valoare optimă a acestei mărimi fizice pentru care sonoluminiscentă apare mai pregnantă. Intensitatea luminoasă mai depinde și de natura soluției supusă acțiunii cîmpului acustic. În tabela 3.8 sînt indicate intensitățile relative ale sonoluminiscentei în cazul mai multor lichide, valorile corespunzînd la trei temperaturi ale acestora.

Tabela 3.8

Natura lichidului	Intensitatea luminoasă relativă		
	25 °C	40 °C	55 °C
Dimetil ftalat	16,0	6,6	2,4
Etilen glicol	12,0	3,4	0,5
Apă	3,6	1,0	—
Clorobenzen	0,84	0,43	0,20
Isoamil alcool	0,54	0,28	0,18
O-xilen	0,36	0,24	0,14
N butil alcool	0,21	0,10	0,03
Toluen	0,15	0,07	0,05
Benzen	0,23	0,06	0,01

Așa după cum rezultă din datele cuprinse în tabelă, în cazul anumitor lichide fenomenul de luminiscentă se produce cu o deosebită intensitate în timp ce pentru alte lichide, cum ar fi tolueul sau benzenul,

luminiscenta apare foarte slabă. Nu se poate afirma cu certitudine că există lichide la care nu se produce fenomenul de luminiscentă atunci când sînt iradiate cu ultrasunete. Dacă totuși la unele lichide cum ar fi tetraclorura de carbon acest efect optic nu a putut fi pus în evidență, cauza rezidă în imperfecțiunea mijloacelor de observație.

Intensitatea luminoasă produsă în urma cavității acustice depinde și de vîscozitatea lichidului: la lichidele cu o vîscozitate mai mare fenomenul apare mai intens. Aceasta explică de ce au fost obținute intensități luminoase mai mari în glicerină decît în apă.

În general, intensitatea luminoasă nu este afectată de impuritățile pe care eventual le conține lichidul, însă cîteva picături de tetraclorură de carbon sau de bisulfid de carbon mărește considerabil sonoluminiscenta apei. De asemenea intensitatea luminoasă poate fi mult mărită prin adaosul de săruri alcaline sau de săruri alcalino-feroase. În schimb intensitatea se reduce prin adăugarea în soluție a unor lichide volatile (eter, sau alcool).

În soluții complet degazate, dificultățile care apar la producerea fenomenului de cavitație se repercutează și asupra fenomenului de sonoluminiscentă. Dacă însă aerul din soluție este înlocuit cu gaze nobile, intensitatea luminoasă crește, devenind cu atît mai mare cu cît greutatea atomică a acestor gaze este mai mare. De exemplu, adaosuri de xenon și de cripton face ca intensitatea luminoasă în raport cu cea corespunzătoare cazului cînd în soluție este existent aerul, să crească de 27, respectiv 9 ori. În schimb, prin dizolvarea hidrogenului în soluție se suprimă complet luminiscenta.

Influența temperaturii asupra intensității luminoase a fost pusă în evidență de mai mulți autori. Creșterea temperaturii face ca fenomenul să scadă în intensitate, dispărînd complet la o temperatură a soluției de 60°—80°C. Descreșterea intensității luminiscentei se manifestă linear, odată cu creșterea temperaturii, fenomenul încetînd să se mai producă la temperaturi diferite, funcție de concentrația sărurilor dizolvate în lichid. În fig. 3.16 este redată această variație în cazul unei soluții de iodură de potasiu avînd diferite concentrații, supusă acțiunii unui cîmp ultrasonic avînd frecvența de 1 MHz, intensitatea acustică în imediata apropiere a transductorului fiind egală cu 2,5 W/cm².

Sonoluminiscenta manifestă și o variație în timp. Dacă la temperatura la care se produce extincția luminiscentei condițiile experimentale sînt menținute aceleași, după un interval de timp luminiscenta reappare, suferind apoi o nouă dispariție, fenomenul succedîndu-se în continuare în mod periodic. O explicație a originii acestui fenomen a fost dată de Degrois și Badilian, care admit că luminiscenta este produsă de cavităția

de gaz, în timp ce extincția sa are loc datorită cavitației de vapor. Prin schimbarea periodică a naturii cavitației se produc aparițiile și disparițiile succesive ale luminiscentei menționate mai sus.

Efectuându-se analiza spectrală a luminii generate în urma fenomenului de cavitație în lichide, s-a constatat că spectrul este continuu, întin-

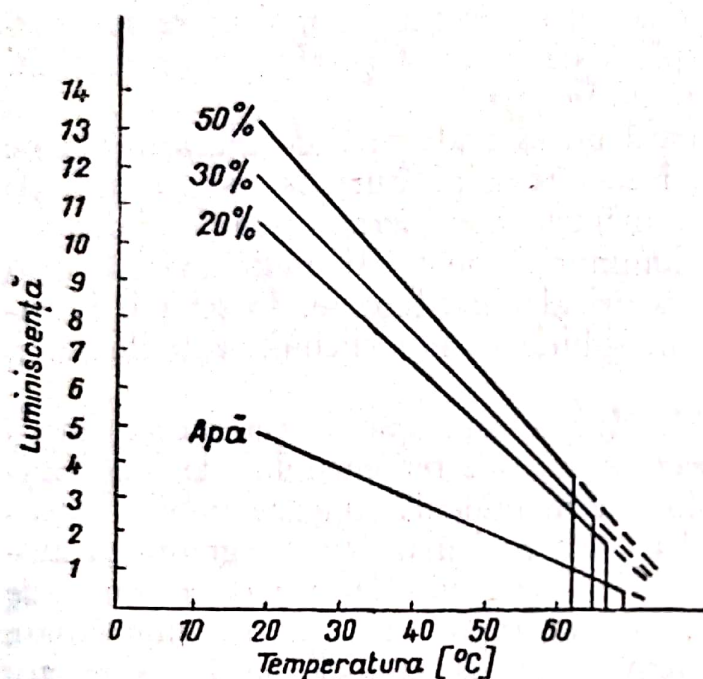


Fig. 3.16. Influența temperaturii asupra luminiscentei ultrasonice, în cazul unei soluții de iodură de potasiu având diferite concentrații.

zându-se de la aproximativ 7 300 Å până la ultraviolet, fiind asemănător celui datorit radiației corpului negru la temperatura de 6 000—10 000°K. În anumite împrejurări în distribuția spectrală mai pot fi observate un spectru liniar și un spectru de bandă, corespunzător unor elemente străine soluției supuse acțiunii ultrasunetelor și existente în aceasta. Astfel dacă se iradiază cu ultrasunete o soluție apoasă a unei sări alcaline, în afara spectrului continuu apare și linia spectrală corespunzătoare metalului respectiv. Dacă sarea alcalină este înlocuită cu o

sare alcalino-feroasă se observă apariția unor spectre de bandă a căror proveniență nu a putut fi încă precizată.

Sonoluminiscenta fiind un efect al cavitației, cercetările au căutat să stabilească momentul producerii impulsului luminescent, în raport cu stadiul de dezvoltare a bulei de cavitație, cu alte cuvinte s-a căutat să se găsească relația de fază între cele două fenomene. Pe cale experimentală s-a constatat că luminiscenta apare în stadiul final al distrugerii bulei de cavitație. După K. Negiski, în apa suprasaturată cu aer, luminiscenta începe să apară la aproximativ 1/5 de perioadă înainte fazei volumului maxim al bulei și prezintă maximum de intensitate în momentul distrugerii complete a bulei după care se produce extincția. În apă cu un conținut redus de aer, luminiscenta începe să apară la o zecime de perioadă înainte ca bula să ajungă la volumul minim.

Pentru explicarea modului de producere a sonoluminiscentei au fost emise mai multe teorii.

Teoria microdescărcărilor electrice, propusă de J. Frenkel, admite că luminiscenta este rezultatul unor descărcări electrice microscopice, care au loc în interiorul bulei de cavitație. Inițial aceasta are forma lenticulară, iar pe pereții ei sînt acumulate sarcini electrice de semne contrare. Câmpul electric se mărește odată cu dezvoltarea bulei de cavitație și pe măsură ce forma suferă o schimbare trecînd de la forma de lentilă la cea sferică. Descărcarea are loc în cavitatea devenită sferică. Conform acestei teorii este de presupus că descărcările electrice apar pe timpul perioadei de expansiune a bulei de cavitație, cînd presiunea din interiorul acesteia este scăzută.

Ținînd seama însă de relația de fază dintre momentul apariției sonoluminiscentei și dezvoltarea bulelor de cavitație, teoria microdescărcărilor electrice apare ca nefundată. În plus, presupunerea existenței unei bule de cavitație de forma unei lentile, nu și-a găsit confirmarea experimental. O asemenea formă n-ar putea-o avea bula decît numai în apa complet degazată, ori tocmai într-un asemenea mediu cavitația și deci sonoluminiscenta nu se produce.

Teoria chimică, propusă de V. Griffing și D. Sette, admite că luminiscenta este rezultatul recombinației radicalilor chimici care iau naștere în urma cavitației. Aceasta implică apariția luminiscentei după implozia bulei de cavitație, astfel încît relația de fază găsită experimental vine să susțină valabilitatea acestei teorii. În plus, existența în spectrul luminiscentei a unor benzi corespunzătoare radicalului OH, ca și unele spectre continue ale H_2O și H_2O_2 ar indica legătura dintre acest fenomen și reacțiile chimice care au loc pe timpul cavitației.

Teoria triboluminiscentei, formulată de L. A. Chambers, atribuie emisia luminii sfărîmării structurii quasicristaline a lichidului, acțiune care s-ar produce în urma presiunilor locale mari care au loc în urma fenomenului de cavitație. Această teorie admițînd apariția luminii în momentul dezvoltării bulelor de cavitație nu este confirmată de rezultatele obținute cu privire la relațiile de fază.

Teoria termică, propusă de Noetink și Neppiras, admite că luminiscenta provine din incandescența resturilor de gaze nedescompuse sau de vapori aflate în interiorul bulelor de cavitație. Prin comprimare adiabatică, aceste reziduri sînt aduse la temperaturi foarte ridicate, devenind în felul acesta incandescente și emițînd lumină. Considerînd real acest mecanism de producere a luminiscentei, el trebuie să aibe loc în faza finală a existenței bulei de cavitație. Ca urmare relația de fază vine să confirme valabilitatea acestei teorii. În plus, spectrul luminiscentei,

asemănător cu cel corespunzător radiației corpului negru la o temperatură de 6 000—10 000° K, pare să constituie o dovadă a existenței unei temperaturi foarte ridicate a gazului în interiorul bulei de cavitație în momentul imploziei acesteia în urma unei comprimări adiabatică. Teoria termică permite și explicarea intensificării luminiscentei în cazul gazelor monoatomice. Acestea dispun de un exponent adiabatic mai ridicat decât cel corespunzător gazelor poliatomice, ceea ce contribuie la o încălzire mai pronunțată a gazului din interiorul bulei, la o aceeași schimbare de volum.

Efecte chimice. Prezența unui câmp ultrasonic de intensitate mare într-un mediu lichid face să fie observate o serie de efecte chimice ca oxidări, reduceri, sinteze, polimerizări, depolimerizări etc. Influența ultrasunetului se poate manifesta fie printr-o accelerare a reacției chimice cunoscute, fie prin producerea unei anumite reacții care în alt mod nu are loc.

Avînd în vedere că procesele chimice rezultate în urma acțiunii ultrasunetelor nu se pot produce decât în cazul în care agentul fizic are o anumită intensitate, cercetătorii au ajuns la concluzia că ele sînt datorite fenomenului de cavitație. Însă pînă în prezent nu s-a putut stabili cu precizie dacă toate procesele chimice sînt datorite exclusiv fenomenului de cavitație și care aspect al cavitației joacă rolul preponderent în efectuarea unei anumite reacții chimice. Unii cercetători afirmă că aceste transformări sînt datorite creșterii temperaturii care are loc în urma compresiunii puternice suferite de bula de cavitație. După alți autori producerea reacțiilor chimice este pusă pe seama creșterii substanțiale a presiunii atunci cînd bula de cavitație implodează. În fine există și părerea că descărcarea electrică ce ia naștere în interiorul bulei de cavitație precum și radiațiile ultraviolete care se produc concomitent și care fac să apară substanțe bogate în energie (molecule ionizate, ioni sau radicali liberi) reprezintă condiția esențială a realizării proceselor de transformare chimică. Studiul efectelor chimice rezultate sub acțiunea ultrasunetelor s-a putut face pe baza analogiei dintre reacțiile chimice produse în urma aplicării acestui agent fizic și reacțiile care se produc sub acțiunea altor agenți fizici ca radiațiile nucleare sau lumina.

O. Lindström și O. Lamm consideră că sub influența ultrasunetelor apa se descompune în atomi de hidrogen și în radicali liberi conform schemei următoare



Imediat după implozia bulei de cavitație, atomii de hidrogen și radicalii liberi trec în mediul apos, unde pot intra în reacție cu diferite sub-

asemănător cu cel corespunzător radiației corpului negru la o temperatură de 6 000—10 000° K, pare să constituie o dovadă a existenței unei temperaturi foarte ridicate a gazului în interiorul bulei de cavitație în momentul imploziei acesteia în urma unei comprimări adiabatică. Teoria termică permite și explicarea intensificării luminiscentei în cazul gazelor monoatomice. Acestea dispun de un exponent adiabatic mai ridicat decât cel corespunzător gazelor poliatomice, ceea ce contribuie la o încălzire mai pronunțată a gazului din interiorul bulei, la o aceeași schimbare de volum.

Efecte chimice. Prezența unui câmp ultrasonic de intensitate mare într-un mediu lichid face să fie observate o serie de efecte chimice ca oxidări, reduceri, sinteze, polimerizări, depolimerizări etc. Influența ultrasunetului se poate manifesta fie printr-o accelerare a reacției chimice cunoscute, fie prin producerea unei anumite reacții care în alt mod nu are loc.

Avînd în vedere că procesele chimice rezultate în urma acțiunii ultrasunetelor nu se pot produce decât în cazul în care agentul fizic are o anumită intensitate, cercetătorii au ajuns la concluzia că ele sînt datorite fenomenului de cavitație. Însă pînă în prezent nu s-a putut stabili cu precizie dacă toate procesele chimice sînt datorite exclusiv fenomenului de cavitație și care aspect al cavitației joacă rolul preponderent în efectuarea unei anumite reacții chimice. Unii cercetători afirmă că aceste transformări sînt datorite creșterii temperaturii care are loc în urma compresiunii puternice suferite de bula de cavitație. După alți autori producerea reacțiilor chimice este pusă pe seama creșterii substanțiale a presiunii atunci cînd bula de cavitație implodează. În fine există și părerea că descărcarea electrică ce ia naștere în interiorul bulei de cavitație precum și radiațiile ultraviolete care se produc concomitent și care fac să apară substanțe bogate în energie (molecule ionizate, ioni sau radicali liberi) reprezintă condiția esențială a realizării proceselor de transformare chimică. Studiul efectelor chimice rezultate sub acțiunea ultrasunetelor s-a putut face pe baza analogiei dintre reacțiile chimice produse în urma aplicării acestui agent fizic și reacțiile care se produc sub acțiunea altor agenți fizici ca radiațiile nucleare sau lumina.

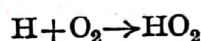
O. Lindström și O. Lamm consideră că sub influența ultrasunetelor apa se descompune în atomi de hidrogen și în radicali liberi conform schemei următoare



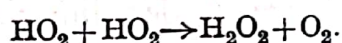
Imediat după implozia bulei de cavitație, atomii de hidrogen și radicalii liberi trec în mediul apos, unde pot intra în reacție cu diferite sub-

stanțe pe care le conține mediul. În raport cu particularitățile și structura lor moleculară, unele substanțe intră în relație cu atomii de hidrogen, iar alte substanțe cu radicalii OH. În felul acesta pot avea loc fie procese de reducere, fie procese de oxidare.

S-a constatat că efectele chimice se manifestă numai în lichidele în care se găsesc dizolvate gaze, de a căror natură depinde cinetica de reacție. De exemplu, formarea apei oxigenate este condiționată de existența oxigenului în soluția lichidă, acesta avînd rolul de a fixa atomii proveniți prin descompunerea apei. Reacția care se produce este

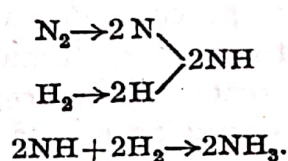


după care se formează apa oxigenată

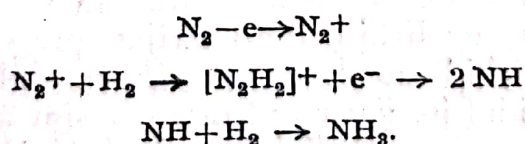


Un rol important îl joacă gazele inerte prezente în mediul lichid. Ele pătrund în bula de cavitație intensificînd procesul de ionizare și mai ales disocierea moleculelor de oxigen. Prudhomme a constatat că viteza de formare a apei oxigenate este mai mare atunci cînd soluția iradiată cu ultrasunete este saturată în prealabil cu argon și nu cu heliu. Aceasta se explică prin faptul că potențialul de ionizare a argonului fiind mai mic decît cel al heliului, descărcările electrice în interiorul bulei de cavitație sînt mult ușurate.

Dacă se ultrasonează apa distilată saturată cu H_2 și N_2 se formează NH_3 . Sinteza amoniacului în asemenea condiții se face în urma disocierii moleculelor de azot și de hidrogen în atomi liberi trecînd apoi prin formarea radicalilor NH, conform reacției



Sinteza amoniacului produsă în urma acțiunii ultrasunetelor poate fi însă și rezultatul apariției în bulelele de cavitație a moleculelor ionizate de azot, și în acest caz reacția se efectuează în felul următor



Asemenea reacții de sinteză mai pot fi produse sub acțiunea undelor ultrasonice și în cazul altor amestecuri. Astfel în apa saturată cu oxid

de carbon și cu hidrogen se poate sintetiza aldehida formică, iar în apa saturată cu oxid de carbon, cu hidrogen și azot poate lua naștere prin iradiere cu ultrasunete acidul cianhidric.

Pot fi obținute efecte opuse celor arătate mai sus, anume de scindare a moleculelor prin ruperea legăturilor dintre atomi. Resturile de molecule se pot uni apoi între ele pentru a forma alți compuși. Astfel iradierea ultrasonică a clorurei de carbon în apă duce la formarea hexacloretanului. Printre produsele de descompunere a iodurii de metil sub acțiunea ultrasunetelor a putut fi pus în evidență un număr mare de substanțe în fază gazoasă ca metan, etan, propan, butan, etilenă ș.a. Așadar, prin ultrasonarea unei substanțe lichide, pot fi obținute efecte diametral opuse de exemplu reducere și oxidare, sinteză sau scindare a substanțelor organice și anorganice, polimerizare și depolimerizare a compușilor macromoleculari. Efectul obținut depinde de condițiile în care are loc reacția.

Producerea unei reacții chimice fiind legată de fenomenul de cavitație, rezultă că este necesară o anumită intensitate acustică limitată pentru ca transformările chimice arătate mai sus să aibă loc. Dacă însă se depășește pragul intensității acustice limită reacția chimică începe să se producă, ea intensificându-se pe măsură ce presiunea acustică crește. Depășindu-se însă o valoare a presiunii acustice, pentru care procesul chimic are loc cu maximum de eficacitate, reacția își pierde din intensitate. De exemplu, cantitatea de iod eliberată dintr-o soluție de iodură de potasiu, atinge valoarea maximă la o presiune acustică egală cu 3 atm. Cercetările recente tind să arate că frecvența ultrasunetului nu joacă un rol important în producerea procesului chimic. Astfel chiar în domeniul megaherzilor o creștere a frecvenței reduce puțin efectul chimic. În schimb presiunea exterioară influențând puternic procesul de cavitație, face să varieze prin aceasta și randamentul transformărilor chimice care au loc. De exemplu cantitatea de apă oxigenată, rezultată în urma iradierii cu ultrasunete a apei, crește pe măsură ce presiunea exercitată asupra apei devine tot mai mare și atinge un maximum pentru o presiune de 1 520 mmHg, după care descrește. La presiuni mai mari de 4 180 mmHg nu se mai produce nici o cantitate de apă oxigenată.

3.2.3. Dispersia ultrasonică. Atunci când un fascicul ultrasonic suficient de intens străbate un lichid, fiind dirijat spre suprafața de separare a acestuia de un alt lichid sau de un gaz, de exemplu apă-ulei, sau apă-aer, particule din lichidul iradiat cu ultrasunete sînt aruncate de la suprafață, adică sînt dispersate în mediul înconjurător. Dacă al doilea mediu este un gaz, în anumite condiții favorabile, se poate produce o ceață foarte fină și deasă deasupra suprafeței de separare.

Prima descriere a acestui fenomen a fost dată de Wood și Loomis, care au observat ceața formată dintr-o fîntînă ultrasonică. Căutînd să explice mecanismul producerii dispersării, Söllner consideră că acesta este datorit cavitației. Cercetările ulterioare efectuate de Bisa, Dirnagl și Esche au ajuns la concluzia că undele capilare de la suprafața lichidului joacă rolul principal în formarea particulelor și în dispersarea acestora în cel de-al doilea mediu. Efectuînd măsurători într-o bandă largă de frecvențe, cuprinsă între 10 și 800 KHz, R. J. Lang a confirmat că undele capilare joacă primul rol în procesul de dispersie ultrasonică, găsind o corelație între mărimea perturbării produsă de ultrasunete la suprafața lichidului și mărimea particulei de lichid dispersată în celălalt mediu.

Conform teoriei bazate pe efectul undelor capilare, mecanismul dispersiei este următorul. Cînd suprafața lichidului este excitată de o undă ultrasonică de o anumită intensitate, o mică picătură se poate desprinde de această suprafață și sub acțiunea diferitelor forțe (presiunea de radiație, forța de accelerare etc.) ea este proiectată rămînînd în suspensie în gazul alăturat. Lungimea undelor de suprafață conform relației lui Kelvin este

$$\lambda_c = \left(\frac{2\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (3.47)$$

unde σ este tensiunea superficială, ρ densitatea lichidului, f frecvența excitatoare.

Atunci cînd undele capilare de suprafață sînt produse prin acțiunea unui fascicul ultrasonic, s-a dovedit că frecvența excitatoare cuprinsă în relația (3.47) este egală cu jumătate din valoarea frecvenței ultrasunetului, adică $f = f_u/2$. În acest caz, relația (3.47) se poate scrie

$$\lambda_c = \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f_u^2} \right)^{1/3}. \quad (3.48)$$

Măsurările efectuate privind dimensiunile particulelor de lichid în suspensie arată o anumită variație a acestor dimensiuni, neuniformitatea particulelor putînd fi datorită a două cauze. Una provine de la acțiunea vibrațiilor de ordin superior care însoțesc vibrația fundamentală și alta este rezultatul ciocnirilor și aglomerării particulelor produse scurt timp după părăsirea suprafeței. Totuși s-a observat că dimensiunile particulelor depind de lungimea undei capilare de suprafață, putîndu-se stabili un diametru mediu al particulei considerată sferică, care este o fracțiune din valoarea lungimii de undă. Relația care leagă cele două mărimi este

$$\bar{D} = 0,34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f_u^2} \right)^{1/3}. \quad (3.49)$$

Pentru un lichid determinat, diametrul mediu al particulelor fiind în funcție de frecvența ultrasunetului, rezultă că mărimea acestor particule precum și densitatea celei pot fi predeterminate și dozate după necesități. Aceasta constituie un avantaj al metodei ultrasonice de dispersare față de alte metode similare.

Pentru producerea dispersiei este necesar ca intensitatea acustică să depășească o anumită valoare, denumită intensitate de prag. Creșterea intensității peste această limită nu contribuie însă la intensificarea procesului, atât timp cât frecvența ultrasunetului rămâne constantă. În plus, apariția acestui fenomen este legată de scurgerea unui interval de timp, de la începutul radiației ultrasonice. Dacă însă intensitatea acustică depășește mult intensitatea de prag, dispersia lichidului într-un mediu gazos nu se mai face sub forma unei fîntîni alcătuite din picături, ci ia forma unei coloane de lichid cilindrice, al cărei diametru depinde mai mult de intensitatea ultrasunetului decât de frecvența acestuia.

Fenomenul de dispersare a particulelor lichide într-un mediu gazos sau lichid cu ajutorul ultrasunetelor își găsește în prezent o largă întrebuințare practică în procesele de formarea aerosolilor în aer și de producerea emulsiilor.

3.3. PROPAGAREA ULTRASUNETELOR ÎN SOLIDE

3.3.1. Viteza de propagare a undei. Într-un mediu solid elastic și izotrop pot exista mai multe tipuri de unde acustice. Un prim tip îl constituie undele longitudinale, la care mișcarea particulei într-un plan al undei se face în direcția de propagare. Un al doilea tip îl reprezintă undele transversale la care mișcarea particulei în planul undei se face după o direcție perpendiculară pe direcția de propagare. Atunci când mediul solid este limitat, există și unde de suprafață, iar dacă mediul solid se prezintă sub forma unei plăci, apar în acest caz unde de placă.

În cazul undelor longitudinale care se propagă printr-un mediu solid izotrop, extins la infinit, viteza de propagare a undei acustice este dată de relația

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{1-\sigma-2\sigma^2}} \quad (3.50)$$

în care E este modulul de elasticitate longitudinal, ρ densitatea materialului, σ coeficientul lui Poisson, definit ca raportul dintre alungirea

(contractia) specifică transversală și contractia (alungirea) specifică corepunzătoare, pe direcția longitudinală, adică $\sigma = \frac{\Delta d}{d} \bigg/ \frac{\Delta l}{l}$.

În cazul propagării undelor longitudinale printr-o bară subțire, influența contractiei transversale poate fi neglijată și viteza de propagare a unei se poate calcula cu ajutorul relației lui Newton

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (3.51)$$

Cu cât însă mediul solid prin care se propagă undele acustice are dimensiuni mai mari în comparație cu lungimea de undă, cu atât mai mult o perturbare produce atât unde longitudinale cât și unde transversale de care trebuie să se țină seama. În consecință, viteza de propagare a unei longitudinale crește, deoarece factorul care introduce în relația (3.50) influența contractiei transversale este întotdeauna supraunitară.

În cazul undelor transversale, viteza de propagare a unei este dată de relația

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.52)$$

în care G este modulul de elasticitate transversal.

Raportul dintre constantele elastice E și G este egal cu $2(1+\sigma)$ și pentru majoritatea corpurilor solide se poate considera că variază foarte puțin în jurul valorii de 2,6. În tabela 3.9 sînt indicate valorile vitezelor de propagare a undelor longitudinale și transversale într-o serie de corpuri solide, indicîndu-se în același timp și valorile coeficienților Poisson respectivi. Cunoașterea cît mai precisă a vitezei de propagare a undelor printr-un corp solid este de o deosebită importanță practică la proiectarea dispozitivelor de întîrziere, întrebuintate în mașinile electronice de calcul și în instalațiile radar, la măsurarea grosimilor cu ajutorul ultrasunetelor, precum și la determinarea constantelor elastice ale unui material.

Datorită faptului că modulul de elasticitate al mediilor solide este mult mai mare decît cel al fluidelor, se constată că valorile vitezei de propagare a undelor longitudinale sînt mai mari decît cele ale vitezei de propagare ale aceluiași unde printr-un lichid, cu toate că densitatea solidelor este în general mai mare decît cea a fluidelor.

Atunci cînd solidul prin care se propagă undele ultrasonice este supus la o solicitare statică, se observă o variație a vitezei ultrasunetelor. Aceasta variază proporțional cu intensitatea solicitării, atîta timp cît nu se depășește limita de elasticitate, observîndu-se o creștere a vitezei în cazul compresiunii și o scădere a vitezei în cazul întînderii. Fenomenul

Tabela 3.9

Natura materialului	Densitatea 10^3 kg/m^3	Coeficientul lui Poisson	Viteza ultrasunetului [m/s]		Impedanța caracteristică $10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$
			C_L	C_T	
Alamă	8,1	—	3830	2050	31,0
Aluminiu	2,7	0,35	6320	3130	17,0
Argint	10,5	0,38	3600	1590	38,0
Aur	19,3	0,42	3240	1200	63,0
Cupru	8,9	0,37	4700	2260	42,0
Magneziu	1,7	0,31	5770	3050	10,0
Nichel	8,8	0,34	5630	2960	50,0
Oțel	7,7	0,28	5900	3230	45,0
Plumb	11,4	0,43	2160	700	25,0
Platină	21,4	0,30	3960	1670	85,0
Staniu	7,3	0,34	3320	1670	24,0
Zinc	7,1	0,25	4170	2410	30,0
Cauciuc moale	0,9	—	1480	—	1,4
Cauciuc tare	1,2	—	2300	—	2,8
Cuarț	2,6	—	5570	3500	14,5
Gheață	0,9	—	3980	1990	3,6
Nylon	1,11	0,40	2620	1070	2,9
Plexiglas	1,18	—	2730	1430	3,2
Polietilen	0,9	0,46	1950	540	1,7
Polistiren	1,06	0,41	2350	1120	2,5
Porțelan	2,45	0,26	5600	3200	13,7
Stearită	2,65	0,26	6400	3660	17,0
Sticlă Pirex	2,32	0,24	5640	3280	13,1

apare deosebit de pregnant în cazul plexiglasului, polimer înalt care are o comportare caracteristică corpurilor visco-elastice. Aceste rezultate pun în evidență existența unor efecte elastice neliniare în asemenea materiale.

Fenomenul de relaxare fiind prezent și în cazul mediilor solide va exista și aici o dispersie a vitezei, problemă care va fi tratată odată cu problema absorbției energiei acustice.

3.3.2. Atenuarea undelor ultrasonice în medii solide. Cauzele care produc micșorarea intensității undei acustice în propagarea sa într-un mediu solid sînt:

- difuzia ultrasunetului de granulele mediului și de eventuale defecte existente în mediu;
- absorbția unei părți din energia acustică transportată de către undă în mediu, datorită:
 - conductibilității termice;
 - interacțiunii dintre undele acustice și electroni în metale;
 - interacțiunii dintre undele acustice și undele termice.

Pierderi de energie acustică datorită difuziei. Ca urmare a structurii granulare pe care o are un mediu solid, pe timpul propagării undelor se produce o difuzie a ultrasunetului cauzată de aceste granule, atunci când lungimea de undă este de același ordin de mărime cu dimensiunile granulei. În plus, anumite defecte în interiorul materialului pot provoca la rândul lor reflexii și refracții ale undelor acustice, ducând astfel și ele la o difuzie a ultrasunetului. Cum aceste reflexii și refracții se pot produce fie în mod regulat, fie neregulat, vom avea o difuzie coerentă sau incoerentă.

Stabilirea pe cale analitică a unei expresii pentru constanta de atenuare corespunzătoare acestui proces este foarte greu de făcut, avînd în vedere faptul că în calcul este necesar să intre o serie de parametri care influențează atenuarea ca forma și mărimea elementelor difuzante (granule sau defecte), densitatea acestor elemente, modul lor de distribuție în masa solidului, anizotropia materialului etc. Datorită tocmai complexității sale, problema difuziei ultrasunetului în medii solide a fost puțin studiată și chiar atunci cînd s-au făcut cercetări s-au luat în considerație elemente difuzante de forme simplificate ca sfere și cilindri. Prin analogie cu difuzia ultrasunetului în fluide, problemă studiată de Rayleigh, s-a căutat să se rezolve și problema difuziei ultrasunetelor în medii solide.

Lîndu-se ca bază și datele experimentale au fost stabilite pentru constanta de atenuare relații aproximative dintre care unele vor fi menționate în cele ce urmează. O asemenea relație valabilă pentru cazuri cînd lungimea de undă este de trei ori mai mare decît diametrul granulei și cînd se neglijează difuzia multiplă, este

$$\alpha_g = \frac{8 \pi^4 d^3 f^4}{5 c^4} \delta \quad (3.53)$$

în care d este diametrul mediu al granulei, δ factorul de difuzie, care depinde de anizotropia materialului. În tabela 3.10 sînt date valorile estimate ale acestui factor pentru unde longitudinale care se propagă în cîteva metale.

Tabela 3.10

Metallul	Aluminiu	Argint	Aur	Cupru	Plumb	Oțel
δ	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$

Cercetările întreprinse de W. P. Mason cu privire la propagarea undelor ultrasonice în metale policristaline au arătat că atenuarea datorită difuziei variază cu puterea a patra a frecvenței ultrasunetului. Pentru



aluminii, avînd mărimea granulelor cuprinsă între 0,23 și 0,13 mm atenuarea poate fi calculată cu următoarea relație experimentală

$$\alpha_g = A_1 f + A_2 f^4, \quad (3.54)$$

în care A_1 este o constantă de histerezis elastic ($A_1 = 10^{-10}$ nep s/cm), A_2 o constantă care depinde de difuzia datorită structurii granulare a materialului ($A_2 = 8 \cdot 10^{-31}$ nep s/cm).

Constanta de atenuare fiind funcție de frecvență la puterea a patra rezultă că procesul de difuzie a ultrasunetului duce la valori ale atenuării de o anumită importanță, în special în domeniul frecvențelor înalte.

Pierderi de energie acustică datorită conductibilității termice. O altă categorie de pierderi provine din faptul că pe timpul propagării unei unde acustice longitudinale se produc compresuni și rarefierii iar temperatură în zona de compresune devine mai ridicată decît cea din zona învecinată de rarefiere. Ca urmare are loc o scurgere a căldurii însoțită de producerea unei entropii și o disipare de energie, de unde va rezulta și o atenuare a amplitudinii undei. În același timp se produce și o slabă modificare a constantei elastice a materialului.

Atenuarea provenită în urma acestui proces depinde de frecvența undei. La frecvențe foarte ridicate, durata unui ciclu nu este suficientă pentru a da posibilitatea unei scurgeri apreciabile de căldură între zonele alăturate de compresune și cele de rarefiere. În acest caz procesul este adiabatic și nu intervine nici o atenuare. Constantele elastice măsurate la propagarea undelor ultrasonice sînt constante adiabatic. La frecvențele joase însă, compresiunile și rarefierile succedîndu-se într-un ritm destul de lent, diferența de căldură dintre zonele de compresune și cele de rarefiere este foarte mică. În acest caz procesul este izoterm și din nou nu apare nici o atenuare. Între aceste valori limită ale frecvenței există un domeniu în care undele suferă o anumită atenuare și în care are loc și o dispersie a vitezei de propagare a undelor. Atenuarea prezintă un maxim atunci cînd perioada undei acustice devine comparabilă cu timpul de relaxare, expresia atenuării specifice fiind

$$\alpha^* = \alpha \lambda = \pi \frac{\Delta E}{E_t} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (3.54)$$

în care

$$\frac{\Delta E}{E_t} = \frac{E_a - E_t}{E_t}. \quad (3.55)$$

unde E_a este modulul de elasticitate corespunzător unei deformări adiabatic, E_t modulul de elasticitate corespunzător unei deformări izoterme și τ timpul de relaxare.

Ținând seama de fenomenul de relaxare care apare și în medii solide, expresia vitezei de propagare a unei longitudinale este

$$c_L = \sqrt{\frac{E_t}{\rho} \left[1 - \frac{\Delta E}{E_t} \frac{1 - \omega^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^2} \right]}. \quad (3.56)$$

În cazul frecvențelor joase când procesul devine izotermic, se regăsește pentru viteză relația (3.51).

Datorită valorilor foarte scăzute ale timpului de relaxare în cazul mediilor solide, ($\tau = 2,4 \cdot 10^{-12}$ s pentru aluminiu, $\tau = 6 \cdot 10^{-12}$ s pentru cupru, $\tau = 5,5 \cdot 10^{-12}$ s pentru plumb etc.), frecvența la care are loc absorbția maximă ($\omega\tau = 1$) este foarte ridicată, pentru cele mai multe metale ea fiind în jur de 10^6 MHz.

Fenomenul de relaxare este așadar prezent în toate cele trei stări de agregare în care se poate găsi o substanță. Va interveni deci o absorbție corespunzătoare acestui fenomen atât atunci când substanța se găsește în stare solidă, cât și atunci când ea se găsește în stare fluidă (gaz sau lichid). Acest lucru a fost pus în evidență de către H. G. Danielmeyer și H. O. Kneser care au efectuat măsurători de atenuare a undelor ultrasonice într-o aceeași substanță (bromul) aflată în cele trei stări de agregare (gazoasă, lichidă și solidă), rezultatele măsurătorilor fiind indicate în fig. 3.17.

Atenuarea undelor acustice prin interacțiunea acestora cu electronii în metale. Măsurările de atenuare a undelor ultrasonice în metale la temperaturi foarte coborâte

au pus în evidență existența unei atenuări apreciabile, care crește pe măsură ce temperatura scade. Acest lucru are loc pînă la un anumit punct, de la care se produce o descreștere bruscă a atenuării atîngînd valori minime în zona de trecere a metalului spre superconductibilitate. Cercetări recente au arătat că mărirea atenuării undelor acustice în

propagarea acestora printr-un metal trebuie să fie atribuită interacțiunii dintre electroni și unda acustică. Acest fenomen a fost stabilit făcîndu-se o apropiere cu fenomenul cunoscut al interacțiunii dintre undele termice

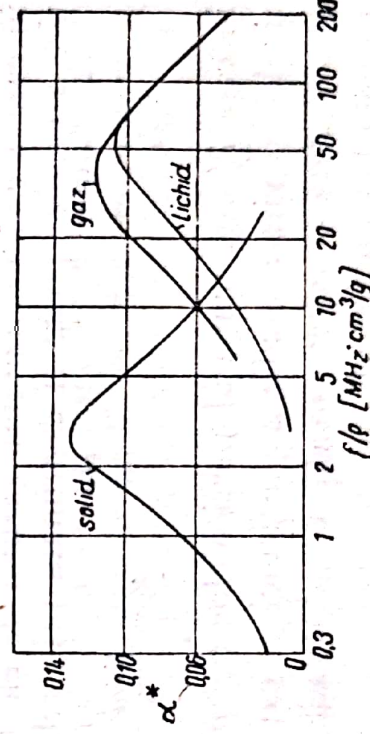


Fig. 3.17. Modul de variație a coeficientului de atenuare în brom, aflat în diferite stări de agregare.

și electronii dintr-un metal, interacțiune care determină conductibilitatea termică și electrică a metalului.

Pentru ca fenomenul să poată fi pus în evidență trebuie ca lungimea de undă a ultrasunetului să fie comparabilă cu liberul parcurs mediu al electronilor sau mai mică decât acesta. La temperatura de 10°K , în cazul metalelor purificate cu grijă, liberul parcurs mediu este de ordinul a 10^{-2} cm. Condiția menționată mai sus este îndeplinită dacă se lucrează cu ultrasunete avînd frecvențe mai mari de 50 MHz, căreia îi corespunde la majoritatea metalelor o lungime de undă în jur 10^{-2} cm. Așadar pentru studierea fenomenului trebuie îndeplinite anumite condiții privind frecvența ultrasunetului și mediul care se cercetează. Ultimele condiții se întîlnesc numai la temperatura heliului lichid și la metale cu un grad de puritate foarte ridicat.

Pentru stabilirea unei expresii care să permită calculul atenuării ultrasunetului datorită interacțiunii dintre undele acustice și electronii din metal, autorii au făcut diverse considerații teoretice. Astfel W. P. Mason a considerat că vîscozitatea gazului de electroni străbătut de undele acustice cauzează o atenuare asemănătoare cu cea care se produce în cazul propagării undelor acustice printr-un mediu gazos sau lichid. În consecință, utilizează pentru undele longitudinale relația cunoscută a lui Stokes

$$\alpha = \frac{8\pi^2 f^2 \eta}{3\rho c^3} \quad (3.57)$$

în care η este vîscozitatea gazului de electroni care conform teoriei cinetice a gazelor poate fi exprimată prin relația

$$\eta = \frac{lNm\bar{v}}{3} \quad (3.58)$$

în care N este numărul particulelor pe unitatea de volum, m masa particulei, $\bar{v}$ viteza medie a particulelor, care în cazul electronilor poate fi interpretată ca viteza medie $\bar{v}_F$, derivată din distribuția Fermi, l liberul parcurs mediu.

Introducînd în locul lui η în (3.57) această expresie, rezultă

$$\alpha = \frac{4\pi^2 Nm\bar{v}_F}{15\rho c^3} f^2 l. \quad (3.59)$$

Această relație este valabilă dacă este îndeplinită condiția $kl < 1$, unde $k = \omega/c$ este numărul de undă. Se constată că constanta de atenuare este proporțională cu pătratul frecvenței ultrasunetului.

Folosind modelul electronului liber, A. B. Pippard, stabilește pentru constanta de atenuare o relație mai generală, valabilă pentru orice valoare a produsului kl . Pentru $kl < 1$, relația dedusă este asemănătoare cu (3.59). În cazul cînd $kl > 1$ constanta de atenuare variază proporțional cu frecvența, fiind dată de relația

$$\alpha = \frac{\pi^2 N m \bar{v}_F}{6 \rho c^2} f. \quad (3.60)$$

O interpretare mai completă a fenomenului a fost dată de M. S. Steinberg bazîndu-se pe ecuația de transport a lui Boltzmann și pe modelul electronului liber într-un metal. În cazul undelor longitudinale, autorul ajunge la următoarele relații care permit calculul constantei de atenuare: pentru $kl < 1$

$$\alpha = \frac{16 \pi^2 N m \bar{v}_F}{15 \rho c_0^2 c_s} f^2 l \quad (3.61)$$

unde

$$c_s = c_0 \left[1 + \frac{3\alpha^2}{4k^2} \left(1 + \frac{5Mc_0^2}{m\bar{v}_F^2} \right) \right]^{1/2} \quad (3.62)$$

în care M este masa unei rețele de ioni.

Pentru $kl > 1$

$$\alpha = \frac{\pi^2 N m \bar{v}_F}{3 \rho c_0^2} f. \quad (3.63)$$

Se observă în primul rînd că și în expresia lui α dedusă de către Steinberg pentru cazul cînd lungimea de undă este mai mică decît liberul parcurs mediu al electronilor ($kl > 1$), constanta de atenuare variază proporțional cu frecvența. În al doilea rînd se constată că toate expresiile care permit calculul lui α deduse de diferiți autori sînt asemănătoare, ceea ce diferă sînt numai coeficienții numerici. Precizia măsurărilor de atenuare însă nu este suficient de mare pentru a permite determinarea exactă a coeficienților numerici și prin aceasta stabilirea expresiilor care conduc la cele mai apropiate valori față de cele reale.

Este interesant de remarcat că introducerea metalului într-un cîmp magnetic face ca atenuarea datorită interacțiunii dintre undele acustice și electroni să scadă foarte mult. Aceasta se explică prin modificarea mărimii liberului parcurs mediu al electronilor sub acțiunea cîmpului magnetic. În urma măsurărilor efectuate de Morse, a putut fi stabilită variația atenuării relative în funcție de mărimea cîmpului magnetic apli-

cat. În fig. 3.18 este reprezentată această curbă de variație în cazul cuprului, frecvența ultrasunetului fiind egală cu 8,6 MHz. Pentru cîmpuri magnetice intense, atenuarea undelor acustice tinde către zero.

Pe lîngă interpretarea bazată pe principiile clasice ale fizicii a fenomenului de interacțiune dintre electroni și undele de frecvență ridicată,

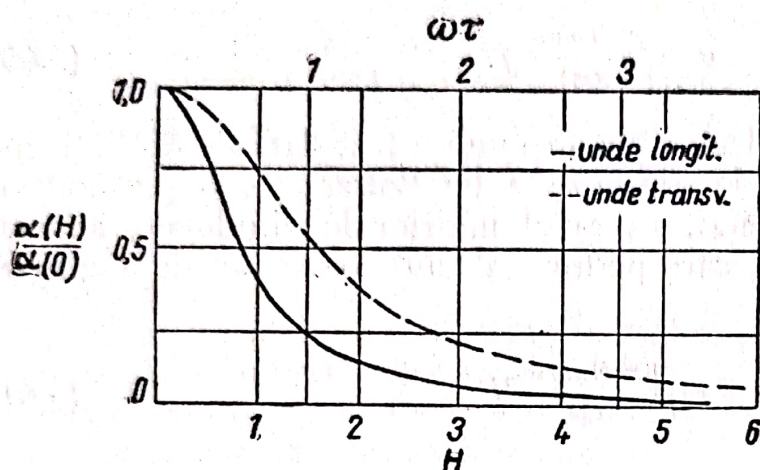


Fig. 3.18. Variația atenuării relative a undelor longitudinale și transversale în funcție de mărimea cîmpului magnetic aplicat.

se tratează ca o interacțiune dintre fononi și electroni, ajungîndu-se la o expresie asemănătoare cu cele indicate mai sus pentru calculul constantei de atenuare a undelor ultrasonice.

Atenuarea undelor acustice prin interacțiunea acestora cu undele termice. O altă cauză care dă naștere unei atenuări a undelor acustice atunci cînd acestea se propagă printr-un solid cristalin aflat la temperaturi foarte coborîte, este interacțiunea dintre undele acustice și undele termice, care ar produce o difuzie a unei unde de către celălalt tip de undă. O altă explicare a acestei interacțiuni este următoarea: propagîndu-se printr-un solid cristalin, undele acustice perturbă starea de echilibru în care se găsesc fononii termici. Cum există tendința de a se restabili echilibrul în distribuția fononilor, aceasta provoacă o creștere a entropiei sistemului determinînd în felul acesta o absorbție a undelor ultrasonice, o parte din energia acustică fiind disipată ca energie termică. Valoarea atenuării depinde de temperatura la care se găsește corpul și de frecvența ultrasunetului. Acest fenomen începe să fie pus în evidență de la o frecvență în jur de $5 \cdot 10^8$ Hz, devenind mai pregnant pe măsură ce frecvența crește. Astfel într-un cristal de cuarț la temperatura de 40°K, constanta de atenuare este mai mică de 0,5 dB/cm, la frecvența de $5,1 \cdot 10^8$ Hz, însă

se mai poate da și o altă interpretare folosindu-se metodele mecanicii cuantice. În acest scop a fost introdusă noțiunea de „fonon”, care reprezintă cuanta elementară a radiației energiei mecanice de vibrație, dată de produsul dintre constanta lui Plank și frecvența undelor ultrasonice, deci de o expresie similară cu cea corespunzătoare cuantei de lumină, adică fotonului. În acest caz problema

atinge valoarea de 7 dB/cm, la o frecvență de $3,9 \cdot 10^9$ Hz. Atenuarea crește pe măsură ce crește temperatura. Astfel tot în cristalul de cuarț, la frecvența de $1,44 \cdot 10^9$ Hz, valoarea constantei de atenuare variază între 3,0 dB/cm, la temperatura de 40°K și 6,9 dB/cm atunci când temperatura corpului atinge 140°K. Însă variația constantei de atenuare cu temperatura devine foarte accentuată la temperaturi mai coborâte, sub 40—50°K. Acestui fenomen, A. I. Akhiezer i-a dat următoarea interpretare. Absorbția undelor ultrasonice depinzând de frecvența ciocnirilor dintre fononii termici, rezultă că în urma scăderii frecvenței acestor ciocniri, atenuarea descrește. Or, atunci când un cristal este răcit el conține mai puțin fononi termici și ca urmare numărul fononilor disponibili ca să se ciocnească este mai redus. Această micșorare a numărului fononilor apare mai pregnantă la temperaturi mai scăzute de 40°K când și valoarea constantei de atenuare scade brusc. Astfel în cazul cristalului de cuarț, o scădere a temperaturii cu 10° de la 40°K la 30°K face ca valoarea constantei de atenuare să scadă cu 1,8 dB/cm la frecvența de $1,44 \cdot 10^9$ Hz. Scăderea este mai accentuată la frecvențe mai ridicate. Astfel la frecvența de $3,9 \cdot 10^9$ Hz pentru un același salt de 10° a temperaturii, valoarea constantei de atenuare scade cu aproximativ 5 dB/cm. Fenomenul n-a fost observat numai în cuarț ci și în germaniu, siliciu și safir.

Studiile teoretice efectuate în acest domeniu au dus la stabilirea unor expresii care permit calcularea constantei de atenuare. O asemenea expresie, în care este pusă în evidență dependența atenuării de temperatură și de frecvența ultrasunetului a fost dată de Bömmel și Dronsfield

$$\alpha = 1,1 \frac{\gamma^3 C T}{\rho c^3} \frac{\omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.64)$$

în care γ este o constantă, C căldura specifică pe centimetrul cub, T temperatura absolută, τ timpul mediu care se scurge între ciocnirile dintre fononi.

O altă relație stabilită de Mason este:

$$\alpha = \frac{DW_0}{2\rho c^3} \frac{\omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.65)$$

în care D este o constantă și W_0 energia termică.

Se constată că expresia (3.64) este analogă cu expresia (3.65), în aceasta din urmă temperatura la care se găsește corpul intrând în relație prin intermediul energiei termice.

3.3.3. Amplificarea ultrasunetelor. Așa după cum s-a arătat, undele acustice propagându-se într-un mediu solid suferă o atenuare. Când însă

într-un asemenea mediu unda acustică excită o undă electromagnetică, valoarea atenuării poate deveni negativă, ceea ce echivalează cu o amplificare a primei unde. Pentru ca fenomenul să poată fi pus în evidență, trebuie ca mediul să fie în același timp semiconductor, pentru a avea un flux de electroni liberi, și piezoelectric, pentru a exista un cuplaj puternic între câmpul electromagnetic și cel acustic. Această condiție este îndeplinită la semiconductoarele piezoelectrice.

Considerăm un asemenea material prin care se propagă o undă ultrasonică longitudinală, cu viteza c_L și căruia i se aplică un câmp electric accelerator, care produce o deplasare a purtătorilor de sarcină în direcția de deplasare a undei acustice, cu viteza v . Dacă acest câmp electric este suficient de intens, el poate imprima în același timp electronilor și o viteză mărită, egală sau chiar superioară vitezei de propagare a undelor acustice. Prin mărirea intensității câmpului electric, grupurile de electroni ajung din urmă unda ultrasonică și tind s-o depășească, atunci când viteza lor este mai mare decât viteza de deplasare a undei. Cum însă electronii caută să-și păstreze poziția lor relativă față de unda acustică, o parte din energia obținută de către electroni, în urma accelerării lor, este cedată undei acustice și în felul acesta amplitudinea ei crește. Fenomenul apare mai pronunțat în cazul anumitor cristale piezoelectrice semiconductoare cum ar fi sulfura de cadmiu și oxidul de zinc. Astfel, într-un corp din sulfură de cadmiu avînd 7 cm lungime s-a obținut un câștig de nivel de intensitate acustică de 18 dB la frecvența de 15 MHz și de 38 dB la frecvența 45 MHz.

Teoretic, maximul de amplificare a undelor acustice în acest mediu, la frecvența de 50 MHz și la temperatura ambiantă este de 60 dB/cm. În practică, valoarea amplificării obținute este mai redusă, datorită imposibilității aplicării unui câmp electric foarte puternic pentru a imprima viteza corespunzătoare fluxului de electroni și care să nu producă distrugerea cristalului.

Un alt material în care s-a obținut o amplificare a undelor acustice este bismutul, care la temperaturi joase asigură o mare densitate a fluxului de electroni și un cuplaj puternic între cele două câmpuri.

O amplificare a undelor acustice a fost realizată și în ceramici piezoelectrice, care dispun de o constantă piezoelectrică de două ori mai mare decât sulfura de cadmiu. Pot fi obținute amplificări superioare celor corespunzătoare materialelor semiconductoare piezoelectrice, cu toate că în practică, pînă în prezent, s-au obținut valori relativ reduse.

Posibilitatea de amplificare a undelor acustice a fost folosită de Tucker pentru a construi un dispozitiv amplificator, analog maser-ului. Dispozitivul constă dintr-un cristal paramagnetic, montat între două cristale

piezoelectrice, din care unul generează undele ultrasonice și al doilea le detectează. Asupra elementului paramagnetic se acționează cu un câmp de microunde electromagnetice. Funcționarea dispozitivului se poate explica admitând existența a 3 nivele energetice, populate în mod diferit de electroni. Nivelul inferior este cel mai populat, în timp ce nivelul superior este cel mai puțin populat (fig. 3.19).

Frecvența undei ultrasonice este astfel aleasă încât să ridice electroni de pe nivelul mediu pe cel superior egalând diferența dintre populațiile celor două nivele. În mod asemănător frecvența undelor electromagnetice este astfel aleasă pentru a ridica electronii de pe nivelul inferior pe nivelul superior restabilind de asemenea o egalitate a populațiilor. Introducând simultan în cristalul paramagnetic ambele tipuri de unde, în urma acțiunii acestora se va

obține un număr mai mare de electroni pe nivelul superior decât pe cel mediu. Aceasta stimulează electronii de a cădea pe nivelul mediu cu o emisie a unei cuante de energie acustică. În felul acesta semnalul acustic introdus în cristalul paramagnetic este amplificat.

Amplificatorul ultrasonic își găsește numeroase aplicații în domenii variate. În fizica semiconductorilor acesta poate fi întrebuințat pentru a fi examinate proprietățile materialului. În domeniul acusticii, în special atunci când se lucrează cu frecvențe foarte ridicate, cu ajutorul unui asemenea dispozitiv pot fi generate unde ultrasonice intense și pot fi detectate unde cu intensitate redusă. Amplificatorul ultrasonic a început să fie întrebuințat în liniile ultrasonice de întârziere și la amplificarea semnalelor electrice.

Din cele arătate mai sus rezultă că în urma propagării undelor ultrasonice de frecvență ridicată, printr-un corp solid, au putut fi puse în evidență o serie de fenomene ca: absorbția energiei acustice, interacțiunea dintre fononi și electroni, interacțiunea dintre fononi acustici și fononi termici, amplificarea undelor acustice. Toate aceste fenomene permit utilizarea undelor ultrasonice la studierea corpului solid. Astfel folosindu-se ca instrument de investigație ultrasunetul, pot fi studiate forțele interatomice, energia de transport, starea de supraconductibilitate, comportarea electronilor de conducție, proprietățile magnetice ale materialelor feromagnetice și altele.

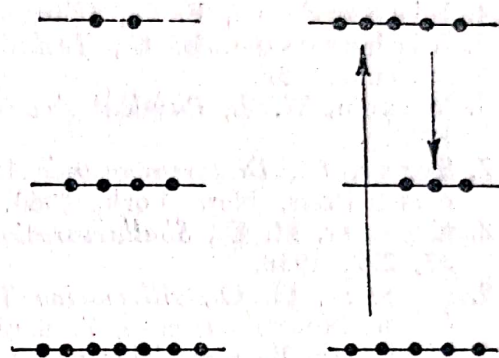


Fig. 3.19. Nivele energetice populate de electroni.

BIBLIOGRAFIE

1. Schaffs, W., *Molecularakustik*, Springer Verlag, Berlin, 1963.
2. Mihailov, I. G., *Osnovî molecularnoî akustiki*, Nauka, Moscova, 1964.
3. Nozdrev, V. F., *Primenenie ultraakustiki v molecularnoî fizike*, Gosudarstvennoe, Fizmatgiz, Moscova, 1958.
4. Richardson, E. G., *Ultrasonic Physics*, Ed. Elsevier, Amsterdam, 1962.
5. Richardson, E. G., *Technical aspect of Sound*, Vol. 2, Ed. Elsevier, Amsterdam, 1957.
6. Mason, W. P., *Physical Aoustics*, Vol. 1, part. A, Academic Press, New York, 1964.
7. Sette, D., *Disperssion and Absorbtion of Sound by molecular Processes*, Academic Press, New York, 1963.
8. Kneser, H. O., *Shallabsorbtion und Dispersion in Flüssigkeiten*, *Annder Physik*, 37, 277, 1938.
9. Kneser, H. O., *Allgemeine Theorie der Shallabsorbtion in Gasen und Flüssigkeiten*, *Nouvo Cimento*, 7, Supl. nr. 2, 231, 1950.
10. Holmes, R. ş.a., *Vibrational Relaxation in Oxigen-Argon, Oxigen-Helium and Oxigen-Hidrogen Mixtures*, Al IV-lea Congres Internaţional de Acustică, Copenhaga, 1962.
11. Fauré, J., *Les phénomènes des relaxations de rotation et de vibration dans les gazes*, *Ann. de Physique*, nr. 1—2, 13—15, 1962.
12. Yakei, Fujii ş.a., *Ultrasonic Absorbtion and Relaxation Times in Nitrogen, Oxygen and Water Vapor*, Al IV-lea Congres Internaţional de Acustică, Copenhaga, 1962.
13. Tempest, W., Parbrook, H. D., *The Absorbtion of Sound in Argon, Nitrogen and Oxygen*, *Acustica*, 7, 6, 354—362, 1957.
14. Dransfeld, K., *Ultrasonic Absorbtion in Liquid Helium at Temperature below 0,6°K*, *Physical Review*, 1, 17—20, 1962.
15. Fox, F. E., Wallace, W. A., *Absorbtion of finite Amplitude Sound Waves*, *J.A.S.A.*, 26, 6, 994—1006, 1954.
16. Towle, D. M., Jindsay, R. B., *Absorbtion and Velocity of Ultrasonic Waves of finite Amplitude in Liquids*, *J.A.S.A.*, 27, 4, 530—533, 1955.
17. Mihailov, I. G., *K voprosu o pogloşenie ultrazvukovîih voln v etilaţetat*, *Acusticeski jurnal*, 4, 2, 199, 1958.
18. Bajulin, P. A., *Pogloşenie ultraakusticeskiîh voln v viazkih jidkostiah*, *Dokladi Acad. Nauk S.S.S.R.*, 31, 2, 114—117, 1941.
19. Mihailov, I. G., *New Data on Sound Velocity in Aquaeous Solutions*, Al IV-lea Congres internaţional de Acustică, Copenhaga, 1962.
20. Nozdrev, V. F., ş.a., *The Absorbtion of Ultrasonic Waves in Liquids at High Frequences*, Al III-lea Congres Internaţional de Acustică, Stuttgart, 1959.
21. Nozdrev, V. F., ş.a., *Untersuchung der Ultraschallwellenabsorbtion bei hoher Temperatur und hohem Druck*, Al III-lea Congres Internaţional de Acustică, Stuttgart, 1959.
22. Elpiner, I. E., *Ultrazvukovaia liuminesţenţia*, *Acusticeski jurnal*, 6, 1, 3—15, 1960.
23. Keck, W., Beyer, R. T., *The Frequency Spectrum of Finite Amplitude ultrasonic Waves in Liquids*, Al III-lea Congres Internaţional de Acustică, Stuttgart, 1959.

73. Jacobsen, E. H., *Microwaves Ultrasonics and Studies of the Solid State*. Al IV-lea Congres Internațional de Acustică, Copenhaga, 1962.
74. Mason, W. P., *Phonon Viscosity and its Effect on Acoustic Wave Attenuation and Dislocation Motions*, Al III-lea Congres Internațional de Acustică, Stuttgart, 1959.
75. Tucker, E. B., *Phonon Maser*, Phys. Rev. Letters, p. 547, 1961.
76. Redwood, M. Shtishleifer, Z., *Absorption of Compressional Waves in Solid from 100 to 1000 Mc/s*, Phys. Letters, 3, 28, 1959.
77. White, D. L., *Amplification of ultrasonic Waves in Piezoelectric Semiconductors*, J. of Appl. Phys., 33, 8, 2547—2548, 1962.
78. Morse, R. W., *Interaction of Acoustical Waves and Electrons*, Physics Today, 16, 3, 19—22, 1963.
79. White, D. L., *The Ultrasonic Travelling Wave Amplifier*, Al IV-lea Congres Internațional de Acustică, Copenhaga, 1962.
80. Hutson, A. R. ș. a., *Ultrasonic Amplification in CdS*, Phys. Rev. Letters, 7, 237, 1961.
81. Dumke, W. P., Haring, R. R., *Ultrasonic Amplification in Semimetals*, Phys. Review, 6, 1974—1977, 1962.
82. White, D. L., Handelsmann, E. T., *Ultrasonic Amplification in Sulfur Doped CdS*, Al V-lea Congres Internațional de Acustică, Liège, 1965.
83. Deputat, J., Pawlowski, Z., *The Photomechanical Effect in NaCl Crystals*. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, 13, 1, 69—78, 1965.
84. Malecki, I., *Les champs conjugués électromagnétiques et élastiques et leurs applications aux problèmes d'acoustique*, Al V-lea Congres Internațional de Acustică, Liège, 1965.

STUDIUL CÎMPULUI ULTRASONIC

4.1. DETECȚIA ULTRASUNETELOR

Determinarea prezenței într-un mediu a unui câmp acustic și definirea cantitativă a acestuia se poate face cu ajutorul detectoarelor ultrasonice. La baza acestei operații stau efectele pe care pot să le producă undele ultrasonice atunci când traversează un mediu și anume efecte mecanice, termice, optice. În cele ce urmează vor fi expuse metodele și dispozitivele de detectare a ultrasunetelor, metode care au la bază efectele menționate mai sus.

4.1.1. Metode mecanice. La propagarea unei unde acustice printr-un mediu se produce o variație periodică de presiune definită ca presiune acustică, precum și o presiune constantă care acționează asupra unei suprafețe de separare a două medii, denumită presiune de radiație. În plus particula mediului se pune în vibrație, cu o anumită viteză, denumită viteză particulei. Toate aceste efecte mecanice generate de propagarea undei permit punerea în evidență a unui câmp ultrasonic ducând la crearea unor dispozitive adecvate acestui scop: microfoane, radiometre, discul lui Rayleigh.

Microfonul. Folosit inițial pentru detectarea sunetelor prin acțiunea pe care o exercită presiunea acustică asupra membranei acestora și prin transformarea ulterioară a vibrațiilor mecanice în oscilații electrice, microfonul și-a extins domeniul de aplicare servind în prezent și la detectarea ultrasunetelor. Unele microfoane au fost doar adaptate pentru a putea lucra și în domeniul ultrasunetelor, lărgindu-li-se considerabil banda de frecvență în care și păstrează sensibilitatea necesară captării vibrațiilor acustice. Din această categorie fac parte microfoanele electrostatice sau

cu condensator. În alte cazuri, microfoanele au suferit modificări mai mari, făcându-le să capteze doar ultrasunete de o anumită frecvență sau dintr-o bandă îngustă de frecvență. În această categorie intră detectoarele de ultrasunete piezoelectrice și magnetostrictive. În fine, necesitățile exploatarei cîmpurilor ultrasonice de intensități sau de frecvențe foarte ridicate au impus construirea unor detectoare speciale.

Cum în practică este necesar a fi captate undele ultrasonice care se propagă prin medii avînd stări diferite, aceasta a impus anumite particularități constructive ale detectorului ultrasonic, ceea ce a determinat denumirea sa diferită. Termenul de *microfon* s-a păstrat în special pentru detectorul așezat într-un cîmp acustic format din unde aeriene. Atunci cînd este acționat de presiunea acustică a undelor ultrasonice care se propagă printr-un lichid, detectorul a fost denumit *hidrofon*, iar atunci cînd elementul mobil al microfonului se găsește în contact direct cu corpul solid prin care are loc propagarea ultrasonice acesta a căpătat denumirea de *palpator*.

În scopul detectării undelor ultrasonice, care se propagă într-un gaz, se utilizează în mod obișnuit microfonul condensator. Acesta constă dintr-un condensator, la care o armătură este formată dintr-o membrană metalică foarte subțire, care poate vibra, constituind membrana vibrantă, iar a doua armătură este masivă și fixă. Condensatorul astfel format este încărcat prin aplicarea unei tensiuni electrice de cîteva sute de volți. Prin vibrarea membranei sub acțiunea undelor ultrasonice rezultă o variație a capacității inițiale a condensatorului, care se traduce într-o variație a tensiunii. Variațiile capacității fiind proporționale cu deplasările medii ale membranei, cu ajutorul microfonului conectat la un aparat de măsurare etalonat, se poate determina valoarea presiunii acustice eficace a undelor ultrasonice.

Pentru ca microfonul să aibă posibilitatea de a lucra în domeniul ultrasonic este necesar ca membrana acestuia să poată vibra cu o frecvență egală cu aceea a undei ultrasonice. Au fost realizate în acest sens membrane metalice foarte subțiri și chiar membrane din sticlă, pe care se aplică prin evaporare în vid un strat subțire de metal. În felul acesta, domeniul de utilizare al microfoanelor condensator a putut fi extins pînă la 100 kHz. Datorită fenomenului de difracție și difuzie a energiei acustice pe suprafața sa, microfoanele condensator destinate a detecta ultrasunete au dimensiuni foarte reduse: capsula microfonului de formă sferică nu are diametrul mai mare de 1,5 cm.

Detectarea undelor ultrasonice foarte puternice care se propagă printr-un mediu lichid poate fi făcută cu ajutorul unui hidrofor electrostatic,

conceput de Eisenmenger și care se bazează pe același principiu ca și microfonul condensator. Cum, în acest caz, presiunea acustică ce acționează asupra membranei este foarte mare, dielectricul nu mai este constituit dintr-un strat de aer ca la microfonul condensator, ci dintr-o foiță de material plastic 2. Aceasta este metalizată pe fața anterioară 1, care este expusă undelor ultrasonice și este lipită pe fața posterioară pe o placă solidă metalică 3 (fig. 4.1).

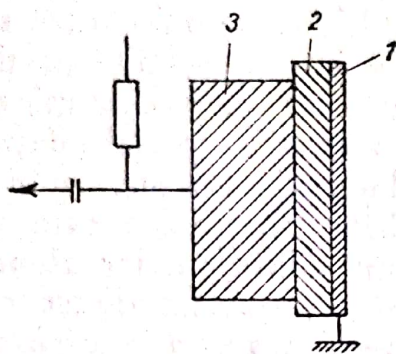


Fig. 4.1. Detector ultrasonic cu dielectric rigid.

1 — strat conductor; 2 — dielectric solid; 3 — placă metalică.

Compresibilitatea foi din material plastic folosită ca dielectric solid este foarte mică, însă datorită presiunilor mari ale undelor incidente grosimea dielectricului poate varia, modificându-se astfel capacitatea condensatorului.

pe fețe opuse, atunci când sînt supuse la solicitări mecanice, ca cele date de acțiunea undelor ultrasonice (efect piezoelectric). Diferența de potențial, care se produce astfel între armăturile cristalului pentru o valoare dată a capacității condensatorului format din armături, dă naștere într-un circuit indus unui curent alternativ de înaltă frecvență care pune în evidență în acest mod existența undelor ultrasonice în locul unde se face măsurarea.

Pentru detectarea undelor ultrasonice care se propagă prin medii lichide și solide, se folosește în mod curent microfonul (hidrofonul, respectiv palpatorul) piezoelectric. El se bazează pe proprietatea pe care o posedă unele cristale, de a produce sarcini electrice

Există o asemănare foarte mare între detectorul piezoelectric și o antenă. La recepție, cîmpul electromagnetic al undei herțiene provoacă în antenă curenți de înaltă frecvență; în mod analog, undele ultrasonice provoacă în circuitul detectorului piezoelectric apariția unui curent de înaltă frecvență. Pentru ca puterea recepționată de antenă să fie maximă, este necesar ca antena să fie acordată pe frecvența postului de emisie; tot astfel și în cazul detectorului ultrasonic, el trebuie să fie astfel dimensionat încît frecvența sa proprie să fie egală cu frecvența undelor ultrasonice emise și care se măsoară.

Intensitatea curentului electric generat în circuitul detectorului se evaluează, fie cu ajutorul unui galvanometru foarte sensibil, după ce în prealabil a fost redresat, fie cu ajutorul unui dispozitiv de rezonanță cu o amplificare ulterioară de joasă frecvență. În primul caz, deviațiile galvanometrului indică direct intensitatea ultrasunetului dacă aparatul a

fost în prealabil etalonat. Faptul că asemenea detectori sînt selectivi, lucrînd numai pe o singură frecvență, constituie un dezavantaj, deoarece în cazul cînd se folosesc în practică ultrasunete de frecvențe diferite, trebuie utilizate mai multe detectoare acordate fiecare pe o frecvență determinată.

Detectoarele piezoelectrice pot fi întrebuințate într-un domeniu larg de frecvențe, alegîndu-se tipul de cristal adecvat și dimensiunile corespunzătoare. Dezvoltarea considerabilă a tehnicii din ultimul timp a permis să fie creată o gamă foarte variată de asemenea detectoare.

Prin folosirea cristalelor sintetice, ca sare Seignette, ADP (amoniu dihidrophosphat), titanat de bariu, fosfat de litiu etc., care dispun de o constantă piezoelectrică superioară celei corespunzătoare cuarțului, este posibil să se construiască detectoare de dimensiuni mici și cu o mare sensibilitate, condiție necesară pentru ca dispozitivul să nu perturbe cîmpul acustic. Un detector piezoelectric este arătat în fig. 4.2.

Acesta folosește ca element sensibil titanatul de bariu 1, sub forma unui tub lung de aproximativ 1,5 mm, avînd diametrul exterior de 1,5 mm, iar diametrul interior de 1,2 mm. Suprafețele exterioară și interioară ale tubului sînt acoperite cu o foiță de argint care constituie electrozii. Izolarea totală a transductorului de mediul înconjurător face posibilă utilizarea detectorului în apă sau într-un alt lichid.

Punerea în evidență a undelor ultrasonice de frecvență foarte ridicată sau determinarea presiunii într-un cîmp acustic neuniform necesită un receptor unidirecțional,

care prin prezența sa, nu trebuie să producă vreo perturbare a cîmpului.

Aceste condiții impun fie folosirea unei sonde avînd la un capăt elementul sensibil, fie introducerea în cîmpul de analizat a elementului sensibil însăși construit însă de dimensiuni foarte reduse. Prima soluție prezintă o serie de

dezavantaje, în special atunci cînd se lucrează la frecvențe înalte. Într-o asemenea situație lungimea de undă a ultrasunetului în materialul din care este confecționată tija, devine comparabilă cu diametrul acesteia, făcînd ca semnalul să apară distorsionat. Acest dezavantaj al sondelor a determinat crearea de detectoare miniaturizate ale căror dimensiuni

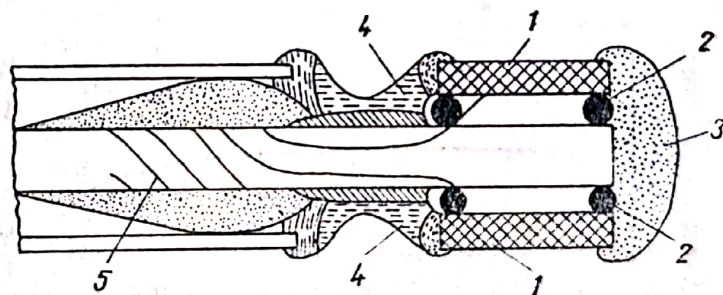


Fig. 4.2. Detector piezoelectric:

- 1 — elementul din titanat de bariu; 2 — tampon de cauciuc;
3 — placă protectoare; 4 — manșon din cauciuc; 5 — fir platină.

sînt mult mai mici decît lungimea de undă. Un asemenea dispozitiv la care dimensiunea maximă nu depășește 0,2 mm a fost realizat de E. V. Romanenko (fig. 4.3). Un fir subțire din platină 1 este trecut printr-un tub de sticlă capilar. La un capăt al firului se găsește elementul piezoelectric realizat sub forma unui strat din titanat de bariu 5 cu grosimea de aproximativ de 0,05 mm depus pe o perlă de platină 4. În felul acesta, perla servește ca electrod interior, în timp ce o placă de argint alcătuiește cel de-al doilea electrod. Între acești doi electrozi se aplică o tensiune de polarizare. O caracteristică a constituției acestui detector o constituie faptul că elementul piezoelectric nu se confecționează separat ci se sinterizează direct pe electrodul interior. Frecvențele proprii ale unui asemenea hidrofون se găsesc în domeniul megaherților. Curba de răspuns a acestui detector miniatură este arătată în fig. 4.4; din figură rezultă că detectorul își păstrează o bună sensibilitate pînă la aproximativ 10 MHz, scăderea sensibilității către această frecvență fiind de ordinul a 30%.

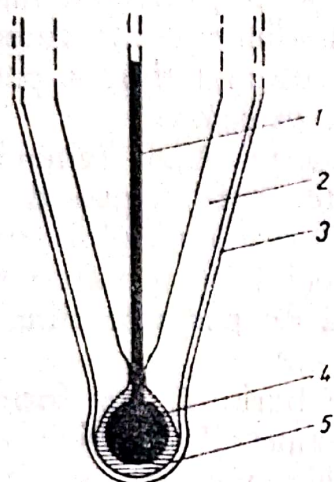


Fig. 4.3. Detector piezoelectric miniatură:

1 — fir din platină; 2 — tub de sticlă capilar; 3 — strat conductor; 4 — perlă din platină 5 — strat de titanat de bariu.

Detectorul are o caracteristică de directivitate circulară în planul perpendicular pe axa dispozitivului de fixare a elementului piezoelectric.

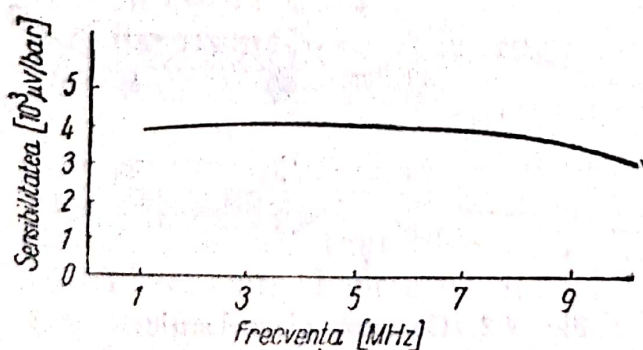


Fig. 4.4. Curba de răspuns a detectorului ultrasonic miniatură.

amplificator și apoi la un aparat de măsurare pentru a detecta și măsura caracteristicile cîmpului ultrasonic.

Detectoarele magnetostrictive sînt mult mai puțin sensibile în comparație cu detectoarele piezoelectrice. Domeniul de frecvență în care pot

În afara detectoarelor piezoelectrice sînt utilizate și detectoare magnetostrictive. Acestea folosesc efectul magnetostrictiv invers. Cu alte cuvinte, o bară dintr-un material feromagnetic supusă unor deformări mecanice, datorită acțiunii undelor ultrasonice, va genera în circuitul care înconjoară bara un curent electric alternativ. Este suficient a lega extremitățile circuitului la un

să fie utilizate este limitat, frecvența maximă ajungînd pînă la aproximativ 30 kHz. Pentru a nu produce perturbații ale cîmpului acustic dimensiunile acestor tipuri de detectoare sînt reduse, fiind de ordinul milimetrilor.

După cum s-a arătat, transductoarele electromagnetice, în special cele piezoelectrice pot funcționa ca detectoare de ultrasunete într-o bandă largă de frecvență. Totuși, folosirea unor asemenea transductoare la frecvențe hipersonice, practic, apare imposibilă. Lungimea extrem de mică a undei implică pe lîngă o dimensiune foarte redusă a detectorului pentru a nu perturba cîmpul acustic în care este introdus, dar și o calitate superioară a transductorului, în sensul ca toate punctele suprafeței radiante să vibreze în fază iar sensibilitatea să fie maximă.

Aceste dificultăți au putut fi evitate prin crearea unui detector cuantic, analog detectorului fotoelectric a cuantei de lumină, totuși destul de diferit de acesta prin faptul că în domeniul acustic nu există un mijloc „fotoelectric” de punere în evidență a cuantei. Detectorul acustic conceput de N. S. Shiren folosește nivelele de spin paramagnetic ale Fe^{++} în MgO . Metoda constă în observarea absorbției unei cuante de radiofrecvență care însoțește absorbția simultană a unei cuante acustice, din această cauză detectorul a fost denumit dublu cuantic. Schema detectorului este arătată în fig. 4.5. Aici $h\nu_1$ este cuanta acustică, iar $h\nu_2$ cuanta de radiofrecvență. Detectorul de radiofrecvență percepe, printr-un ghid de undă adecvat, energia reflectată de cristalul de MgO (Fe^{++}), iar C este cavitatea rezonantă care pune în vibrație cristalul de cuarț Q. Din cauză că energiile cuantei ultrasonice $h\nu_1$ și a cuantei de radiofrecvență $h\nu_2$ sînt diferite, se alege astfel suma lor încît să fie egală cu energia care separă două nivele de spin ale ionului Fe^{++} așezat în cîmpul magnetic respectiv cînd se produce rezonanța. Metoda este deci bazată pe rezonanța paramagnetică de spin. În fig. 4.6 este arătată schema energetică a tranziției pe două nivele de spin $-1, +1$, în urma absorbției celor două cuante de radiofrecvență $h\nu_2$ și acustică $h\nu_1$, propusă de Shiren.

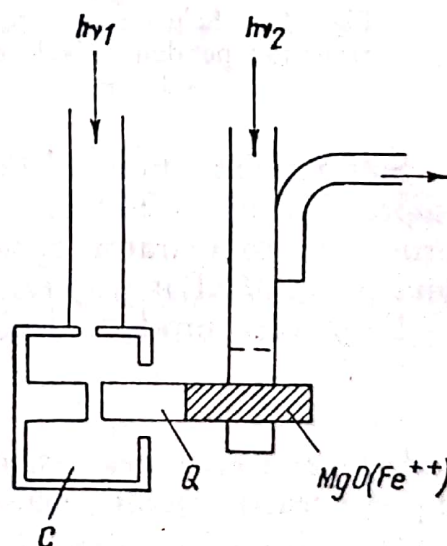


Fig. 4.5. Schema detectorului ultrasonice concepută de N. S. Shiren.

Radiometrul. Între intensitatea acustică și presiunea de radiație existând relațiile (1.99) și (1.100), această mărime poate fi folosită la punerea în evidență a unui câmp ultrasonic și la determinarea intensității acustice corespunzătoare. Un astfel de dispozitiv este denumit radiometru. În forma sa cea mai simplă, un radiometru se compune dintr-un disc de diametru mic, suspendat de un suport rigid, prin intermediul a două fire lungi și de greutate neglijabilă (fig. 4.7). Discul se introduce în mediul în care are loc propagarea undelor (gaz sau lichid).

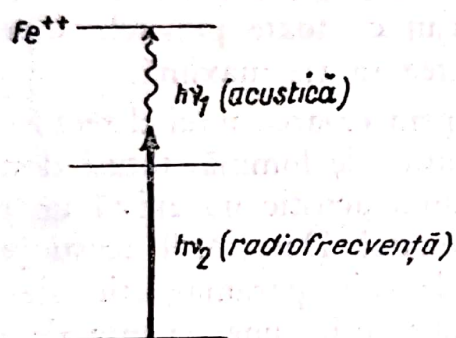


Fig. 4.6. Schema energetică a tranziției pe două nivele de spin $-1, +1$.

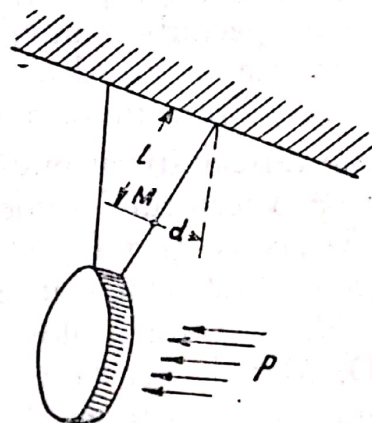


Fig. 4.7. Radiometru sub formă de pendul oscilant.

Sub acțiunea presiunii de radiație exercitată de un fascicul ultrasonic asupra discului, acesta se va deplasa din poziția sa de repaus. Cu ajutorul unui comparator optic, se poate măsura valoarea deplasării d a unui punct M aflat pe firul de suspensie la o distanță l de suportul rigid.

Forța care produce deplasarea discului este

$$F = \Pi S = \frac{G \cdot d}{l} \quad (4.1)$$

unde G este greutatea discului măsurată în mediul în care este introdus; Π presiunea de radiație acustică, S aria discului.

Dacă suprafața discului lovită de undele acustice este complet absorbantă, folosind relația (1.100), intensitatea acustică este

$$I = \frac{Gdc}{Sl} \quad (4.2)$$

unde c este viteza de propagare a undelor longitudinale în mediul în care este introdus discul. Ca materiale absorbante acustic pot fi utilizate vata de sticlă, vata minerală, poliuretanul etc.

Dacă suprafața discului este perfect reflectantă, din relația (1.99) se poate deduce intensitatea acustică

$$I = \frac{Gdc}{2Sl} \quad (4.3)$$

În acest caz, o incidență normală a undelor poate afecta măsurătoarea din cauza formării undelor staționare. De aceea se preferă o incidență oblică, în care caz radiometrul capătă o formă sferică, conică sau o altă formă geometrică adecvată. În felul acesta, undele reflectate sînt dirijate după o direcție normală la direcția de propagare a undelor incidente și energia acestora este absorbită cu ajutorul unor materiale absorbante acustic.

Atunci cînd fasciculul ultrasonic este dirijat vertical, de jos în sus, pentru măsurarea intensității acustice prin intermediul presiunii de radiație, se poate folosi o balanță. Detectorul de o formă conică este suspendat de un platan al balanței, care se găsește în echilibru atîta timp cît emițătorul de ultrasunete nu funcționează (fig. 4.8). Punînd în funcțiune emițătorul, datorită presiunii de radiație, asupra detectorului se exercită o forță care face ca balanța să se dezechilibreze. Pentru a readuce balanța în starea inițială de echilibru este necesar a pune pe platanul detectorului o greutate adițională G egală cu forța produsă de fasciculul ultrasonic asupra detectorului. Considerînd suprafața laterală a conului perfect reflectantă, intensitatea acustică este dată de relația

$$I = \frac{Gc}{2S \cos^2 \alpha} \quad (4.4)$$

unde S este suprafața laterală a conului lovită de undele ultrasonice, 2α unghiul de la vîrf al conului.

Pentru a se evita interferențe de unde în mediul lichid, pereții interiori ai vasului sînt căptușiți cu materiale absorbante acustic.

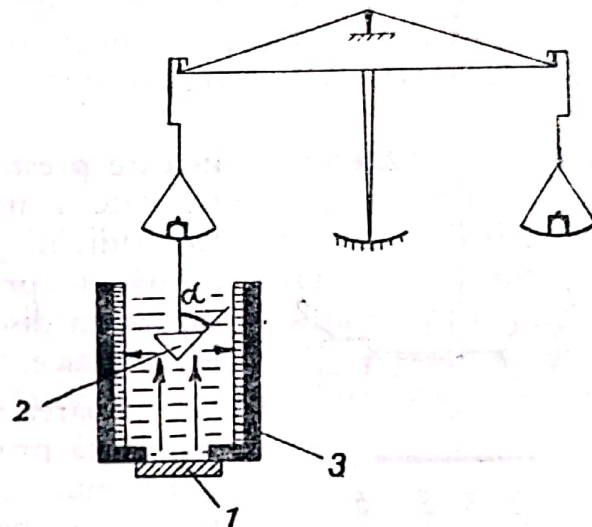


Fig. 4.8. Radiometru balanță:
1 — emițătorul piezoelectrice; 2 — detectorul ultrasonic; 3 — material absorbant acustic.

Discul lui Rayleigh. Rayleigh a constatat că un disc mic și ușor atârnat de un fir, aflat într-un mediu care se deplasează într-o anumită direcție, suferă o torsiune căutând să se orienteze cu suprafața sa perpendicular pe direcția curgerii fluidului. Această constatare rămâne valabilă și în cazul unei deplasări alternative a particulelor mediului, cu alte cuvinte fenomenul are loc și în cazul când prin mediul, în care este introdus discul, se propagă unde acustice.

Calculând momentul de torsiune M datorit prezenței undelor acustice, König a găsit relația

$$M = \frac{4}{3} \rho a^3 U_{ef}^2 \sin 2\theta \quad (4.5)$$

în care ρ este densitatea fluidului, a raza discului, U_{ef} viteza medie pătratică, sau eficace, a particulei mediului pusă în mișcare în urma perturbației creată de propagarea undelor, θ unghiul dintre suprafața discului și direcția de propagare a undelor acustice.

Valoarea momentului de torsiune putând fi determinată prin aplicarea unei metode optice, reflectarea unui fascicul luminos de o oglindă fixată pe firul de suspensie a discului, se poate calcula imediat intensitatea acustică, cunoscută relația care există între această mărime și viteza eficace a particulei

$$I = \frac{3c}{8Ma^3 \sin 2\theta} \quad (4.6)$$

Fig. 4.9. Discul lui Rayleigh:

1 — disc; 2 — contra greutate; 3 — fir de cuarț;
4 — oglindă; 5 — disc amortizor.

Stabilirea relației (4.5) s-a făcut în anumite ipoteze: fluidul este incompresibil și lipsit de vîscozitate, discul nu suferă o mișcare de translație sub acțiunea undelor acustice, nu există o difracție a ultrasunetelor datorită discului, sînt neglijate vîrtejurile care s-ar forma în jurul discului. Cum aceste ipoteze simplificatoare conduc în anumite cazuri la erori apreciabile de măsurare, s-a căutat să se corecteze relația (4.5), ținîndu-se seama și de efectele mișcării de translație a discului și ale fenomenului de difracție, stabilindu-se relația

$$M = \frac{4}{3} \rho a^3 U_{ef}^2 \sin 2\theta \frac{m_1 \left[1 + \frac{2}{5} (ka)^2 \cos^2 \theta \right]}{m_1 + m_0 \left[1 + \frac{1}{5} (ka)^2 \right]} \quad (4.7)$$

unde m_1 este masa discului mai puțin masa lichidului deplasat, m_0 masa hidrodinamică a discului, care poate fi calculată din $m_0 = \frac{8}{3} \rho a^3$, k numărul de undă ($k = 2\pi/\lambda$).

Pentru valori mici ale produsului ka (discuri de diametre mici și ultrasunete de frecvențe coborâte), termenii care conțin acest factor pot fi neglijati.

Din expresia momentului de torsiune se constată că acesta devine maxim pentru $\theta = 45^\circ$, ceea ce indică așezarea optimă a discului pentru a se obține sensibilitatea maximă a dispozitivului. Datorită rezonanțelor mecanice ale discului, măsurătorile sînt lipsite de precizie într-un domeniu de frecvență al ultrasunetelor apropiat de frecvențele de rezonanță ale discului.

4.1.2. Metode termice. Una din aceste metode, *metoda firului cald*, se bazează pe proprietatea ce o are un fir metalic subțire cu o capacitate calorică mică de a-și modifica rezistența electrică în urma încălzirilor și răcirilor succesive. Cum la trecerea undelor ultrasonice printr-un mediu se produc asemenea variații de temperatură, rezultă că prin urmărirea modificării rezistenței electrice a firului cald se poate pune în evidență prezența undelor ultrasonice. Datorită faptului, însă, că în cazul ultrasunetelor frecvențele sînt ridicate, variațiile periodice de temperatură nu pot fi urmărite din cauza inerției termice a detectorului, se folosesc detectori termici de viteză a particulelor. În acest caz, răcirea firului cald se produce ca urmare a mișcării particulelor, cauzată de propagarea undelor ultrasonice.

Detectorul se compune dintr-un fir de platină, avînd un diametru de cîțiva microni (fir Wollaston), încălzit prin trecerea unui curent electric prin el și montat la o punte Wheatstone foarte sensibilă. Rezistența electrică a firului variază direct proporțional cu amplitudinea undelor ultrasonice.

În fig. 4.10 sînt arătate rezultatele obținute cu un asemenea detector, în cazul unui cîmp de unde staționare ($f = 81,7$ kHz). În abscisă s-au trecut distanțele dintre firul cald și suprafața cristalului emițător, iar în

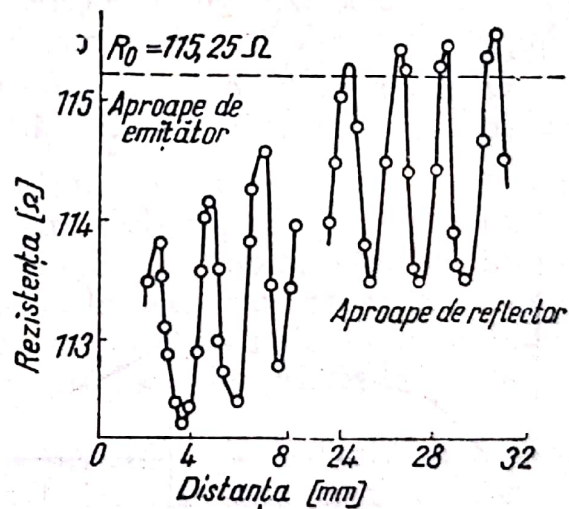


Fig. 4.10. Variația cu distanța a rezistenței electrice a unui detector ultrasonic cu fir cald.

ordonată sînt trecute rezistențele electrice corespunzătoare ale firului. Valorile maxime ale rezistenței corespund punctelor nodale, unde nu există o deplasare a particulelor de gaz sau de lichid. Valorile minime ale rezistenței corespund punctelor ventrale, unde agitația particulelor devine considerabilă.

Din examinarea rezultatelor indicate în figură se constată că atunci cînd explorarea cîmpului ultrasonic se efectuează într-o zonă din vecinătatea cristalului emițător, rezistența firului în punctele nodale nu atinge valoarea R_0 pe care o are rezistența firului atunci cînd asupra sa nu acționează unde ultrasonice. În schimb, într-o zonă din apropierea reflectorului, valorile maxime ale rezistenței depășesc chiar valoarea R_0 , ceea ce înseamnă că acolo firul suferă o încălzire suplimentară. Explicația acestui fapt trebuie căutată în „vîntul cuarțului”. Acest curent de aer produce în apropierea suprafeței emițătoare a cuarțului o răcire suplimentară a firului, care este cu atît mai pronunțată cu cît distanța de la detector la emițător este mai mică. Căzînd pe suprafața reflectătoare, curentul de aer dă naștere unui vîrtej care stingherește curentul normal de convecție produs de firul metalic încălzit, ceea ce înseamnă un motiv de încălzire a acestuia. Metoda permite măsurarea lungimii de undă cu o precizie de aproximativ 1%, iar asemenea dispozitive au fost folosite pînă la 200 kHz. Prin reducerea detectorului la un simplu fir subțire, cîmpul ultrasonic nu suferă nici o perturbație prin prezența detectorului.

O altă metodă, care folosește un termocuplu, se bazează pe fenomenul de transformare a unei părți din energia acustică ce se propagă printr-un mediu în energie termică, acest fenomen fiind unul din cauzele absorbției acustice. Energia termică produsă depinde de natura mediului, de intensitatea acustică și de frecvență.

Dispozitivul detector este alcătuit dintr-un termocuplu introdus într-un mediu absorbant acustic, constituit fie dintr-un lichid, fie dintr-un material poros, ale căror caracteristici de absorbție sînt cunoscute. Supus acțiunii undelor ultrasonice,

prin transformarea unei părți din energia acustică în energia termică, mediul se încălzește, rezultînd o creștere a temperaturii în punctul de joncțiune al lamelelor termocuplului. Această variație de temperatură

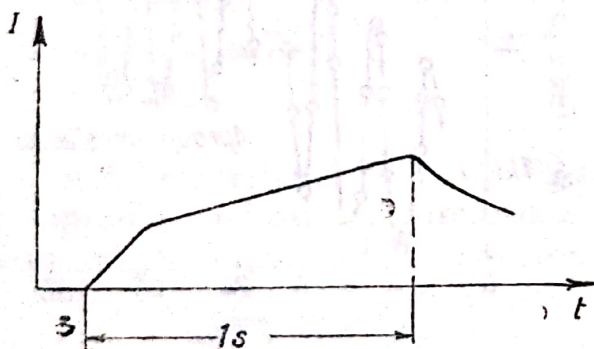


Fig. 4.11. Variația curentului termoelectric sub acțiunea unui impuls ultrasonic.

poate fi determinată măsurându-se cu ajutorul unui galvanometru mărimea curentului termoelectric. În fig. 4.11 este redat modul de variație a acestui curent rezultat în urma acțiunii unui tren de unde rectangulare, avînd o durată de o secundă.

În funcție de variația în timp a temperaturii $\left(\frac{dT}{dt}\right)_0$ la începutul perturbației se poate determina intensitatea acustică în imediata apropiere a termocuplului, folosindu-se în acest scop relația

$$I = \frac{\rho c}{2\alpha} \left(\frac{dT}{dt} \right)_0 \quad (4.8)$$

în care α este coeficientul de absorbție acustică a mediului, ρc capacitatea termică pentru unitatea de volum a lichidului conținut în dispozitiv.

Folosindu-se relația (4.8), aparatul indicator al detectorului poate fi astfel etalonat încît să indice direct valorile intensității acustice.

4.1.3. Metode optice. Este cunoscut că o rază de lumină atunci cînd străbate medii cu densități diferite suferă o refracție. Aceste modificări de densitate pot surveni și într-un același mediu în timpul propagării unei unde ultrasonice, care provoacă o serie de condensări și rarefierii în direcția de propagare, distanța dintre două condensări sau două rarefierii succesive fiind egală cu lungimea de undă a ultrasunetului. Din această cauză densitatea mediului, deci unghiul de refracție, variază periodic. Mediul prin care se propagă undele ultrasonice se comportă în felul acesta ca o rețea optică paralelă cu direcția de propagare a ultrasunetului. Așadar, atunci cînd o rază luminoasă străbate un fascicul ultrasonic, ea suferă o refracție, o schimbare a direcției de propagare a luminii în raport cu direcția undei incidente. Acest fenomen a fost pus în evidență concomitent în S.U.A. de către Debye și Sears și în Franța de către Lucas și Biquard. Este un exemplu de cuplaj indirect între un cîmp acustic și un cîmp electromagnetic. În acest caz, propagarea undelor luminoase este influențată de către cîmpul ultrasonic în mod indirect, prin modificările pe care acesta le produce proprietăților fizice ale mediului.

Efectul fiind datorit schimbărilor periodice ale indicelui de refracție al mediului care la rîndul lor depind de presiunea acustică, rezultă că fenomenul este cu atît mai pronunțat și mai ușor de pus în evidență cu cît variațiile indicelui de refracție sînt mai mari. Acest lucru se obține în special la propagarea undelor ultrasonice în apă, fenomenul devenind greu de observat în gaze sau în solide transparente.

Instalația cu ajutorul căreia se poate pune în evidență fenomenul menționat este arătată în fig. 4.12. Instalația cuprinde un vas V , cu pereți plani-paraleli și transparenti, umplut cu apă. La baza vasului este

montat un cristal piezoelectric, care constituie emițătorul ultrasonic C , iar la partea superioară vasul este închis cu un capac, care are fixat pe partea sa interioară material absorbant acustic A . Evitându-se reflexia undelor ultrasonice produse de emițător, în lichidul din vas există numai unde progresive.

Fasciculul de lumină care străbate vasul după o direcție perpendiculară pe direcția de propagare a undelor ultrasonice plane, este generat

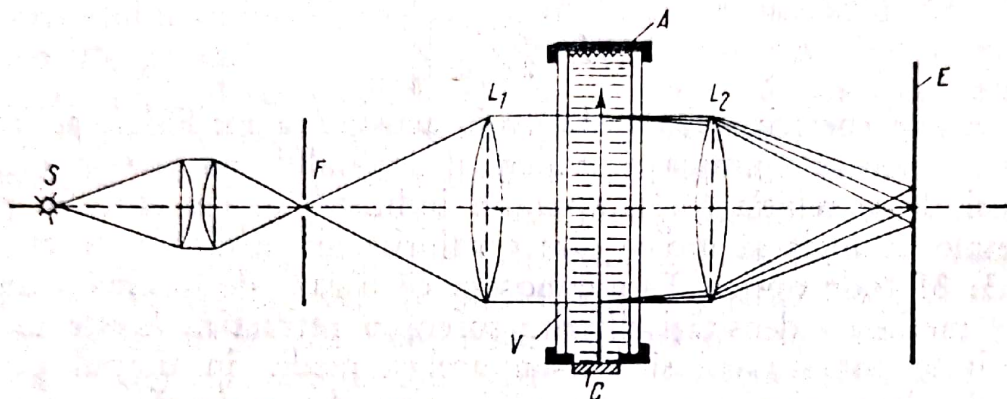


Fig. 4.12. Schema dispozitivului pentru punerea în evidență a difracției luminii sub acțiunea ultrasunetelor.

de o sursă de lumină S , plasată în fața unei fante F . Instalația cuprinde și un număr de lentile optice. Lentila L_1 generează un fascicul luminos cu raze perfect paralele, iar lentila L_2 proiectează imaginea reală a sursei pe un ecran E , care coincide cu planul focal al lentilei.

În absența unui câmp ultrasonic în lichidul din vas, pe ecran apare o pată luminoasă în focarul lentilei L_2 , denumită imagine centrală sau nedifracată. Atunci când elementul piezoelectric este pus în vibrație, deci atunci când în lichidul din vas există o propagare de unde ultrasonice, pe ecran se poate observa pe lângă pata luminoasă de o parte și de alta a axei o serie de pete luminoase, care alternează cu zone întinse ca și cum ar fi generate de o serie de surse luminoase echidistante. Formarea zonelor de intensitate luminoasă maximă și minimă se datorește faptului că raza de lumină este deviată față de direcția incidente cu un unghi θ . Dacă lumina dată de sursa S este monocromatică, imaginile de difracție care apar pe ecran sînt simple.

Dacă se notează cu θ_n , unghiul corespunzător imaginii de difracție de ordinul n , valoarea acestui unghi se poate determina cu ajutorul unei relații asemănătoare celei folosite în cazul rețelelor optice.

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{\lambda_u} \quad (4.9)$$

unde λ este lungimea de undă a luminei incidente, λ_u lungimea de undă a ultrasunetului.

Pe de altă parte, dacă se notează cu D distanța de la lentila L_2 la ecran și cu d_n depărtarea centrului imaginii de difracție de ordinul n de centrul imaginii directe, se poate scrie relația

$$\frac{d_n}{D} = \sin \theta_n. \quad (4.10)$$

Egalînd cele două relații se obține

$$\lambda_u = n\lambda \frac{D}{d_n}. \quad (4.11)$$

Ținînd seama că $\lambda_u = c/f$, din relația (4.11) se poate determina viteza de propagare a ultrasunetului prin lichidul conținut în vas

$$c = n\lambda f \frac{D}{d_n}. \quad (4.12)$$

Cum distanțele D și d_n pot fi măsurate cu ușurință și precizie, determinarea lungimii de undă a ultrasunetului și a vitezei de propagare a acestuia din relațiile (4.11) și (4.12), reprezintă o metodă simplă și precisă. Această metodă poate fi aplicată atît în cazul undelor ultrasonice progresive, cît și în cazul undelor staționare.

Studiind fenomenul difracției luminii de către undele ultrasonice, Raman și Nagendra Nath au determinat cu ajutorul teoriei lui Rayleigh cu privire la difracția unei unde plane care cade perpendicular pe o suprafață cu neregularități periodice, intensitatea luminii corespunzătoare imaginilor de diferite ordine. Pentru imaginea de ordinul n , de exemplu, intensitatea luminoasă este dată de relația

$$I_n = J_n^2(a) \quad (4.13)$$

$J_n(a)$ fiind o funcție Bessel de ordinul n cu argumentul

$$a = 2\pi l \Delta\mu / \lambda \quad (4.14)$$

unde l este lungimea traseului optic în fasciculul ultrasonic echivalentă cu lățimea acestui fascicul, $\Delta\mu$ variația maximă a indicelui de refracție produsă de către unda ultrasonică în lichid și λ lungimea de undă a luminii în vid.

Avînd posibilitatea măsurării intensității luminoase a imaginii folosind relația (4.13) se poate determina intensitatea acustică cu condiția stabilirii în prealabil a unei corelații între variația indicelui de refracție și variația presiunii acustice. Această corelație poate fi stabilită cunoscînd

că variația de presiune acustică într-un mediu creiază o variație a densității mediului, care la rîndul său produce o modificare a indicelui de refracție. Într-adevăr, ținînd seama că

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

iar

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho c^2} p_{max}$$

unde p_{max} este presiunea hidrostatică maximă, expresia argumentului a , dată de relația (4.14), devine

$$a = \frac{2\pi l \mu}{\lambda \rho c^2} p_{max}. \quad (4.15)$$

Pe de altă parte, între intensitatea acustică I_a și presiunea hidrostatică maximă existînd relația

$$I_a = \frac{p_{max}^2}{2\rho c}$$

rezultă că

$$a = 8,85 \frac{l \mu}{\lambda c} \left(\frac{I_a}{\rho c} \right)^{1/2}. \quad (4.16)$$

În cazul cînd în vas se introduce apă, atunci $\rho = 1$, $\mu = 0,347$ și $c = 1,5 \cdot 10^5$, iar prin măsurarea intensității luminoase a unei imagini de un anumit ordin se poate calcula intensitatea ultrasunetului produs de emițătorul ultrasonic în vas.

Trebuie menționat, însă, că la studiul cîmpului ultrasonic cu ajutorul metodei optice, apar și o serie de complicații datorite în primul rînd unei difracții anormale care se produce ca urmare atît a unei frecvențe ridicate a ultrasunetului, cît și a lățimii fasciculului ultrasonic. Într-adevăr, atunci cînd acest fascicul nu este suficient de îngust, nu se mai poate considera că lumina se propagă pe o distanță infinit mică. Din această cauză razele incidente paralele, în afară de difracție, mai suferă și o curbare care poate duce la o interferență secundară a acestora în anumite plane de-a lungul unor linii numite linii de convergență.

În urma cercetărilor întreprinse, G. W. Willard indică limita pînă la care poate fi considerată difracția normală și poate fi aplicată teoria lui Raman și Nath. Acest criteriu este exprimat prin relația

$$\frac{f_z l a}{2\pi} \leq \frac{c^3 \mu_0}{16 \lambda} \quad (4.17)$$

în care f este frecvența ultrasunetului în herți, μ_0 indicele de refracție a ultrasunetului în mediu.

În plus, mai intervine o altă complicație datorită efectului Doppler. Acesta apare datorită faptului că rețeaua de difracție formată de undele ultrasonice progresive se deplasează după o direcție perpendiculară pe cea a luminii incidente. Din această cauză va apărea o diferență între frecvența luminii incidente și aceea a luminii difractate. Datorită însă valorii mici a vitezei de propagare și frecvenței mari a luminii acest efect este redus și se poate neglija în practică.

În ultimii ani această metodă a fost folosită și pentru studierea distorsiunii unei unde ultrasonice de intensitate mare. Acest procedeu se bazează pe constatarea făcută de Zankel că imaginile de difracție produse prin traversarea de către o undă luminoasă a unui fascicul ultrasonic existent în apă pot fi anulate prin emiterea unui al doilea fascicul ultrasonic în același mediu, de o aceeași intensitate cu primul, însă în opoziție de fază cu acesta. Dacă undele ultrasonice conțin armonice, completa anulare a imaginilor nu mai este posibilă, deoarece nu se mai obține o defazare cu 180° a tuturor componentelor. În felul acesta, prin examinarea imaginilor produse pe ecran se poate deduce gradul de distorsiune a celor două unde ultrasonice, emise simultan în mediul din interiorul vasului instalației.

4.1.4. Vizualizarea câmpului ultrasonic. Studiarea unui câmp acustic este ușurată de multe ori de posibilitatea vizualizării acestui câmp. Există mai multe metode care permit vizualizarea undelor ultrasonice în propagarea lor printr-un gaz sau printr-un mediu lichid sau solid transparent.

O metodă optică este așa numita metodă a câmpului întunecat sau metoda Toepler. Ea se bazează pe refracția unui fascicul luminos ca urmare a unei neomogenități a mediului, de exemplu o variație de densitate, interpusă în calea fasciculului, care este împiedicat astfel să ajungă la punctul de observare, ochiul sau placa fotografică.

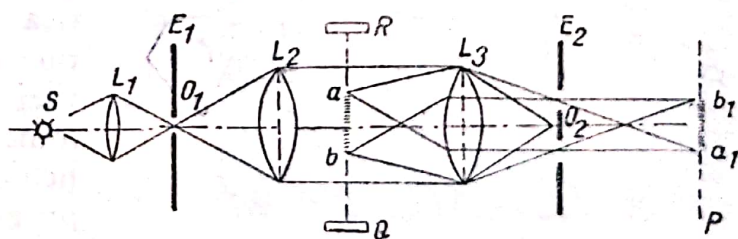


Fig. 4.13. Schema dispozitivului pentru vizualizarea undelor acustice prin metoda Toepler.

În fig. 4.13 este reprezentat schematic dispozitivul care permite fotografierea undelor ultrasonice făcute vizibile prin această metodă. Lumina produsă de sursa S este concentrată cu ajutorul lentilei L_1 într-un orificiu

circular O_1 practicat în ecranul E_1 . Acest orificiu se găsește în focarul unei alte lentile L_2 , care transmite mai departe un fascicul de raze paralele. Lentila L_3 face ca toate razele fascicului să convergă într-un punct O_2 în care se găsește un mic ecran E_2 , care împiedică lumina să se propage mai departe. Între lentilele L_2 și L_3 fasciculul de lumină străbate mediul în care se produce o neomogenitate provocată de propagarea undelor ultrasonice.

În absența unui câmp acustic prin mediul gazos sau lichid care se examinează, fasciculul de lumină lovește obstacolul L_2 și nu ajunge la planul T , care rămîne întunecat. Atunci cînd în fluid are loc o propagare a undelor ultrasonice, razele de lumină sînt mai mult sau mai puțin deviate din drumul lor inițial și vor ocoli obstacolul E_2 dînd pe planul P imaginea a' și b' a punctelor de neomogenitate a , b , cuprinse în planul M aflat în mediu. În felul acesta, pe planul P este reconstituită cu exactitate configurația cîmpului acustic. Dacă, de exemplu, în planul M se creează unde ultrasonice staționare prin emisia undelor de către placa de cuarț Q și prin reflexia acestora de suprafața reflectantă R , pe ecranul P se va obține imaginea acestor unde sub forma unor benzi luminoase, care alternează cu benzi întunecate care pot fi fotografiate.

Metoda cîmpului întunecat se poate folosi și pentru vizualizarea undelor acustice progresive la care maximele și minimele de presiune se propagă cu o anumită viteză. Din această cauză se utilizează fie iluminarea stroboscopică, fie observarea fenomenului printr-o oglindă care se rotește cu o turație potrivit aleasă. Un asemenea dispozitiv conceput de Bergmann, pentru a face posibilă vizualizarea cîmpului acustic într-un lichid, este arătat schematic în fig. 4.14. Atît timp cît prin mediu nu se

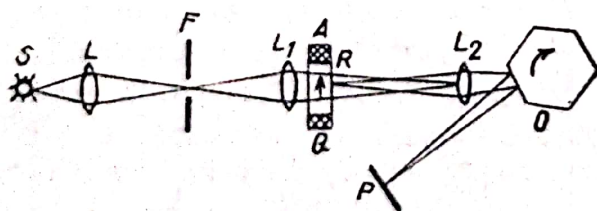


Fig. 4.14. Schema dispozitivului pentru vizualizarea undelor acustice progresive.

propagă unde ultrasonice, imaginea fantei F se formează pe un mic ecran ce se află în fața lentilei L_2 astfel încît planul P rămîne întunecat. Atunci cînd prin lichid se propagă unde acustice progresive, planul P apare iluminat uniform, dacă oglinda rotitoare O se găsește în stare de repaus. Dacă, însă, această oglindă

este rotită în sensul și cu viteza convenabil aleasă, pe ecranul P apar o serie de benzi luminoase și întunecate, corespunzătoare comprimărilor și rarefierilor provocate în mediu de trecerea undelor acustice.

Între viteza c de propagare a undelor în mediul conținut în recipientul R și viteza c_u a undelor în imaginea obținută pe planul P există relația

$$\frac{c}{c_u} = \frac{d_1}{d_2}$$

de unde

$$c = c_u \frac{d_1}{d_2} \quad (4.18)$$

în care d_1 este distanța dintre recipient și lentila L_2 , iar d_2 distanța de la lentila L_2 la ecran.

Dacă oglinda rotitoare este astfel așezată încît distanța de la suprafața ei la lentila L_2 este egală cu distanța de la aceeași suprafață la axa de rotație, n fiind turația oglinzii, viteza v_i cu care se deplasează imaginea undelor pe ecran este

$$v_i = \frac{2 \cdot 2 \pi n d_2}{60} = \frac{\pi n d_2}{15} \quad (4.19)$$

În cazul cînd oglinda se mișcă cu o viteză v_i egală cu viteza c_u , într-un sens invers cu sensul de deplasare al undelor în imagine, imaginea undelor pe ecran stă pe loc. În acest caz

$$c = \frac{\pi n d_1}{15} \quad (4.20)$$

relație care permite determinarea vitezei de propagare a undelor printr-un mediu, cunoscînd distanța d_1 și turația oglinzii rotitoare. Această metodă dă posibilitatea măsurării vitezei fără a fi nevoie să se cunoască în prealabil frecvența ultrasunetului.

O a treia metodă pentru vizualizarea cîmpului acustic se bazează pe fenomenul de difracție a undelor luminoase care străbat un mediu transparent în care există un sistem de unde acustice staționare, fenomen descris la § 4.1.3. Imaginea undelor staționare poate fi observată direct pe ecranul pe care acesta se formează sau poate fi fotografiată (fig. 4.15). Observarea figurii de difracție sau a planelor

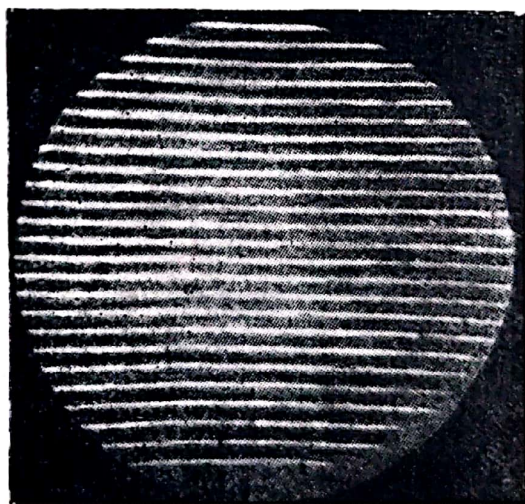


Fig. 4.15. Imaginea fotografică a undelor staționare.

undelor vizualizate procură informații cu privire la aspectul cîmpului ultrasonic din interiorul corpului cristalin. În felul acesta se poate cunoaște dacă un mod de vibrație este pur sau este cuplat cu alte moduri de vibrație. În plus această metodă dă posibilitatea determinării cu precizie a valorii absolute a vitezei de propagare a undelor ultrasonice.

În sfîrșit, o altă metodă, concepută de R. Pohlman, se bazează pe acțiunea presiunii de radiație acustică asupra unei suprafețe plane așezată în calea undelor acustice. Datorită acestei presiuni, o plăcuță mică și foarte ușoară de aluminiu, aflată în suspensie într-un mediu, este orientată perpendicular pe direcția de propagare a undelor.

În absența cîmpului acustic, plăcuțele de aluminiu au o orientare oarecare. Atunci cînd un fascicul de unde ultrasonice traversează mediul, aceste plăcuțe sînt orientate toate în aceeași direcție, normală la direcția de propagare. Făcînd să cadă asupra zonei în care se găsesc plăcuțele în suspensie, orientate de către cîmpul acustic, un fascicul de lumină, acesta este reflectat putînd fi observat pe un fond întunecat și punînd astfel în evidență prezența ultrasunetelor. În lipsa acestora, plăcuțele avînd o orientare arbitrară lumina care cade asupra lor este difuzată în toate direcțiile. Pentru a putea fi vizualizate prin această metodă, undele ultrasonice trebuie să aibă o intensitate relativ ridicată, pentru ca presiunea de radiație să poată fi suficient de mare spre a putea dirija plăcuțele de aluminiu aflate în suspensie.

Metodele de vizualizare a cîmpului acustic indicate mai sus pot fi aplicate, în principiu, în cazul propagării undelor prin orice mediu transparent, gazos, lichid sau solid. Trebuie menționat însă că în cazul solidelor, fenomenele sînt mai complexe decît într-un fluid, deoarece, pe de o parte, prin reflexia undelor de suprafață de separare a solidului se formează întotdeauna unde staționare, iar, pe de altă parte, datorită contracției transversale apar și unde de alt tip decît cele longitudinale, astfel încît corpul prezintă față de lumină o rețea ultrasonică foarte complicată.

O metodă de vizualizare a cîmpului ultrasonic intens într-un lichid se bazează pe procesul de degazare a lichidului, supus acțiunii undelor ultrasonice. Metoda a fost descrisă de N. I. Konevski. Datorită cavitației, în masa lichidului iau naștere bule cu aer sau cu gaz, care în cazul unui sistem de unde staționare se concentrează în nodurile de presiune, unde rămîn într-o stare de repaus. Avînd posibilitatea punerii în evi-

dență, printr-o iluminare judicioasă, a zonelor de concentrare a bulelor, poate fi pus astfel în evidență însuși câmpul acustic.

Pentru obținerea unei imagini clare și cu un bun contrast a câmpului acustic este necesar ca axul aparatului de fotografiat să fie perpendicular, atât pe fasciculul ultrasonic cât și pe fasciculul de lumină. În plus, trebuie să se asigure absorbția luminii difuzate în vas, folosindu-se în acest scop benzi din cauciuc negru introduse în vasul care conține lichid.

Metoda bulelor de gaz are o aplicare limitată prin faptul să nu permită vizualizarea câmpului acustic decât într-un mediu lichid și numai în cazul undelor progresive. În plus, are și o sensibilitate scăzută, așa încât este indicată doar pentru vizualizarea câmpurilor acustice de intensități mari, de ordinul a $0,5 \text{ W/cm}^2$.

4.1.5. Încăperi speciale pentru măsurări acustice în lichide. Întocmai după cum în măsurările acustice efectuate în aer cu unde de audiofrecvență sînt necesare anumite încăperi tratate, pentru ca în interiorul acestora să fie stabilit câmpul acustic dorit (liber sau difuz), tot astfel și în măsurările din domeniul ultraacusticii, efectuate într-un mediu lichid, în scopul determinării intensității acustice, etalonării dispozitivelor de măsurare, determinării vitezei și absorbției undei acustice (cu ajutorul anumitor metode) este necesară existența unui câmp acustic determinat. Astfel, atunci cînd se urmărește studierea propagării undelor progresive, încăperea sau vasul care conține lichidul prin care se propagă aceste unde trebuie să asigure cît mai mult cu putință formarea unui câmp liber. Aceasta se realizează prin crearea unor suprafețe limitatoare ale vasului cu un grad înalt de absorbție a energiei acustice.

Vase speciale cu pereții tratați acustici pe fața lor interioară sînt folosite în special pentru măsurări cu ultrasunete de frecvențe pînă la 50 kHz. La frecvențe mai mari, atenuarea undelor în lichid, indiferent de natura acestuia, este destul de mare pentru ca undele ce se formează în urma reflexiilor de suprafețele care limitează vasul să mai poată concura la formarea unui câmp reverberant, în special în vase cu capacități mari. Se consideră că un tratament acustic este eficace dacă materialul cu ajutorul căruia se realizează prezintă un coeficient de reflexie acustică mai mic sau cel mult egal cu 0,1. În afară de această condiție, materialele folosite în tratarea acustică a interiorului vasului nu trebuie să fie atacate de lichidul conținut în vas și nu trebuie să se deformeze sau să-și piardă calitățile absorbante atunci cînd se lucrează la temperaturi înalte sau la presiuni ridicate.

4.2. MĂSURAREA CONSTANTELOR DE PROPAGARE A UNDELOR

Așa după cum s-a arătat, într-un gaz pot exista numai unde longitudinale; într-un lichid, conținut într-un recipient a cărui adâncime este mare în raport cu lungimea de undă, pot exista, pe lângă undele longitudinale, și unde de suprafață, iar într-un mediu solid se pot propaga unde longitudinale, unde transversale și unde de suprafață. Cum cel mai uzual tip de undă este unda longitudinală, în cele ce urmează vor fi expuse metodele de măsurare a constantelor care intervin în propagarea unor astfel de unde. În mod separat vor fi prezentate și metodele de determinare a vitezei de propagare a undelor transversale.

Într-un caz real, propagarea printr-un mediu a undelor longitudinale are loc cu pierderi de energie; variația presiunii acustice în funcție de distanță și timp este dată de relația (1.100). În această relație intervine constanta de propagare (γ) a undei alcătuită din două componente, constanta de atenuare (α) și constanta de fază (β), funcție de viteza de propagare a undei c . Cum cei doi parametri, viteza și constanta de atenuare diferă de la un mediu la altul, iar pentru un anumit mediu ele depind de condițiile fizice (temperatură, presiune etc.) în care acesta se găsește, determinarea acestor mărimi reprezintă o necesitate, atât în cazul studierii mediului respectiv, cât și în cazul a numeroase aplicații practice, legate de determinarea modului de elasticitate și factorului de pierderi interne printr-un material.

Au fost elaborate numeroase metode care permit măsurarea vitezei ultrasunetului și a constantei de atenuare, folosindu-se în acest scop, fie unde continue, fie impulsuri ultrasonice. Cu toate că unele din aceste metode permit măsurarea concomitentă atât a vitezei cât și a constantei de atenuare, totuși modul de determinare a acestor două mărimi se va trata separat.

4.2.1. Măsurarea vitezei undelor longitudinale. Există două grupe de metode care permit determinarea vitezei de propagare a unei unde ultrasonice.

Metode directe, la care viteza se calculează în funcție de lungimea parcursului undei ultrasonice l și de durata folosită pentru a străbate acest parcurs t . Relația dintre aceste trei mărimi este

$$c = \frac{l}{t} \quad (4.21)$$

Metode indirecte, la care viteza se determină în funcție de lungimea de undă λ , măsurată cunoscând frecvența ultrasunetului f . Relația dintre aceste trei mărimi este

$$c = \lambda f. \quad (4.22)$$

Metodele din prima grupă folosesc în general impulsuri ultrasonice, în timp ce metodele din grupa a doua folosesc unde continue. În cazul măsurărilor cu unde continue, în medii fluide, se caută a se realiza un regim de unde staționare. Bazându-se pe fenomenul de interferență, asemenea metode se mai numesc și interferometrice. În cazul mediilor solide, prin folosirea undelor continue se caută să se producă fenomenul de rezonanță și din acest motiv metodele au primit denumirea de metode de rezonanță.

Interferometrie ultrasonică. Primul dispozitiv de acest gen a fost creat de G. W. Pierce în anul 1925. În forma sa cea mai simplă, interferometrul cuprinde două suprafețe plane paralele și reflectante, între care se găsește o coloană de gaz sau de lichid ce se examinează, în interiorul căreia se stabilește un sistem de unde staționare (studiat la 1.6.2). Una din suprafețele reflectante este constituită din fața emițătorului piezoelectric obișnuit un cristal de cuarț de tăietură X, iar a doua suprafață este constituită dintr-un reflector solid. Prin deplasarea acestuia în raport cu emițătorul ultrasonic, înălțimea coloanei de fluid poate fi variată, modificarea făcându-se cu o cantitate ce poate fi măsurată cu precizie.

Funcționarea interferometrului se bazează pe reacția pe care coloana de fluid, în care au fost stabilite undele staționare, o exercită asupra plăcii emițătoare, favorizând sau împiedicând vibrația acesteia. S-a arătat la 1.6.2 că pe reflector se produc reflexii multiple și, pentru anumite poziții ale acestuia, adică pentru anumite înălțimi ale coloanei de fluid, toate undele reflectate ajung în fază pe suprafața cristalului. Într-un asemenea caz, reacția coloanei de fluid asupra cristalului atinge un maxim și, în

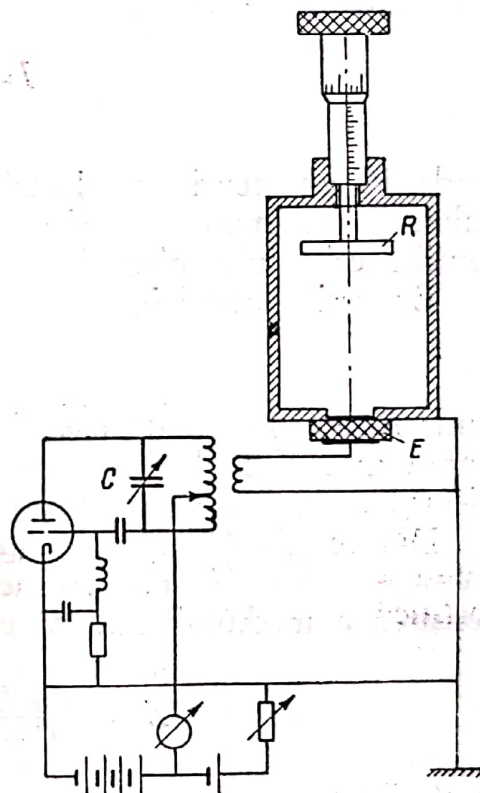


Fig. 4.16. Schema de montaj a unui interferometru ultrasonic:

E — placa de cuarț emițătoare; R — placa reflectoare.

consecință, amplitudinea cu care vibrează placa emițătoare trece printr-un minim. Aceasta se traduce printr-o scădere a impedanței electrice a circuitului de alimentare a emițătorului și, în consecință, curentul crește simțitor. Un efect invers, mărirea impedanței electrice și, ca urmare, micșorarea curentului are loc pentru alte poziții ale reflectorului, deci pentru alte înălțimi ale coloanei de fluid. Variația curentului în circuitul electric al emițătorului poate fi pusă în evidență cu ajutorul unui termocuplu și al unui galvanometru.

Pentru montajul indicat în fig. 4.16, care se utilizează cel mai frecvent în practică, în care cristalul emițător se montează în paralel cu condensatorul C al circuitului oscilant serie, valoarea curentului în circuit este dată de relația

$$I = \frac{V_0}{Z_0} = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{Z_i \omega^2 C_0^2}} \quad (4.23)$$

unde, V_0 este tensiunea electrică aplicată, Z_0 impedanța electrică a circuitului, R_0 rezistența electrică a circuitului, Z_i impedanța electrică echivalentă a cristalului piezoelectric pus în sarcină pe o coloană de fluid.

Expresia acestei impedanțe este

$$Z_i = R_i + \frac{Z_m}{4\beta^2} \quad (4.24)$$

unde R_i este rezistența electrică datorită pierderilor din cristal, Z_m impedanța mecanică de intrare datorită reacției coloanei de fluid, β coeficientul de transformare electromecanică.

Din relația (1.74), știind că $P = U\rho c$, unde P este amplitudinea presiunii acustice, U amplitudinea vitezei particulei și ρc impedanța caracteristică a mediului, rezultă expresia impedanței mecanice.

$$Z_m = \frac{P_{0E} S}{U_{0E}} = \rho c S \frac{1 + \rho_R e^{-(\alpha + jk)2l}}{1 - \rho_R \rho_E e^{-(\alpha + jk)2l}} \quad (4.25)$$

unde S este aria suprafeței de radiație a cristalului și l înălțimea coloanei de fluid.

Considerînd suprafața cristalului perfect reflectantă ($\rho_E = 1$) și introducînd în (4.23) expresia lui Z_i dată de relațiile (4.24) și (4.25), pentru curentul din circuitul oscilatorului se obține expresia

$$I = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{\omega^2 C_0^2 \left[R_i + \frac{\rho c S}{4\beta^2} \left(\frac{1 + \rho_R e^{-(\alpha + jk)2l}}{1 - \rho_R e^{-(\alpha + jk)2l}} \right) \right]}} \quad (4.26)$$

Se constată că valoarea curentului depinde de mărimea înălțimii coloanei de fluid. Când $l = \frac{n\lambda}{2}$, unde n este un număr întreg, în coloana de fluid se stabilesc unde staționare cu nodul la suprafața cristalului și curentul din circuitul oscilatorului atinge valoarea maximă, egală cu

$$I_{max} = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{\omega^2 C_0^2 \left[R_t + \frac{\rho c S}{4\beta^2} \left(\frac{1 + \rho_R e^{-2\alpha l}}{1 - \rho_R e^{-2\alpha l}} \right) \right]}} \quad (4.27)$$

Când $l = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$, în coloana de fluid se stabilesc unde staționare cu antinodul la suprafața cristalului, iar curentul devine minim, egal cu

$$I_{min} = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{\omega^2 C_0^2 \left[R_t + \frac{\rho c S}{4\beta^2} \left(\frac{1 - \rho_R e^{-2\alpha l}}{1 + \rho_R e^{-2\alpha l}} \right) \right]}} \quad (4.28)$$

Deplasînd reflectorul cu ajutorul rozetei unui micrometru care permite măsurarea cu precizie a distanței între două maxime succesive ale curentului, egală, așa după cum s-a arătat, cu jumătatea lungimii de undă și cunoscînd frecvența oscilatorului, se poate calcula imediat valoarea vitezei sunetului în mediul considerat. Pentru obținerea unei precizii cît mai mari a determinării, în practică se măsoară deplasarea L corespunzătoare unui număr suficient de mare de vîrfuri ale curentului. Dacă numărul acestor vîrfuri este n , relația care permite calcularea vitezei este

$$c_L = \frac{2Lf}{n} \quad (4.29)$$

Trebuie observat că metoda dă rezultate bune în cazul măsurărilor în gaze și lichide, la care constanta de atenuare este mică, deci în medii care prezintă o slabă absorbție a undelor ultrasonice. Dacă αl , are valori ridicate, variațiile impedanței sînt mici și, așa după cum se poate vedea din relațiile (4.27) și (4.28), nu există o diferență sensibilă între I_{max} și I_{min} .

În afară de interferometrul creat de Pierce și modificat și îmbunătățit ulterior, au fost create și alte tipuri de interferometre ultrasonice. Unul dintre acestea este *interferometrul cu drum fix*, la care coloana de fluid rămîne constantă. În interiorul mediului se stabilește la fel un sistem de unde staționare, iar spațiul dintre placa piezoelectrică emițătoare și suprafața reflectorului este explorat cu ajutorul unui receptor.

Prin deplasarea receptorului în lungul coloanei de fluid pot fi puse în evidență nodurile și antinodurile de presiune, care se succed la intervale egale cu $\lambda/4$. Cunoșcând distanța dintre două maxime sau două minime succesive, precum și frecvența oscilatorului se poate calcula viteza ultrasunetului.

Un asemenea tip de interferometru se folosește în mod obișnuit la determinarea dispersiei vitezei ultrasunetului în funcție de temperatura sau presiunea mediului. Într-un asemenea caz, punerea în evidență a maximelor sau a minimelor de presiune se poate face prin măsurarea curentului din circuit care variază datorită reacției coloanei de fluid asupra plăcii de cuarț. Această variație nu mai este datorită modificării înălțimii coloanei de fluid ca la interferometrul Pierce ci se datorește modificării agentului fizic corespunzător (temperatură sau presiune). La un astfel de interferometru distanța fixă l este egală cu un număr întreg n de jumătăți de lungimi undă. Când temperatura sau presiunea variază, curentul va varia de asemenea atingând valori maxime la rezonanță pentru $n \frac{\lambda}{2}$, $(n+1) \frac{\lambda}{2}$ etc.

Calculul vitezei ultrasunetului în acest caz se face cu relația

$$c_L = \frac{2lf}{n \pm m} \quad (4.30)$$

În care m este numărul intervalelor dintre punctele de rezonanță obținute prin variația presiunii, respectiv temperaturii.

La un interferometru cu drum fix, construit de Matto și Richardson și utilizat pentru măsurarea vitezei de propagare a ultrasunetului prin vapori, sistemul de unde staționare este detectat cu ajutorul unui fir cald ce poate fi deplasat în lungul axului interferometrului. Principiul de detecție este cel arătat la 4.1.2. Variația rezistenței firului măsurată la o punte Wheatstone, permite să se pună în evidență nodurile și antinodurile undelor staționare. Din forma curbelor de variație a rezistenței firului în funcție de distanța explorată se poate determina lungimea de undă. Cunoșcând frecvența oscilatorului, calculul vitezei ultrasunetului se poate face fără greutate.

Un alt tip de interferometru este acela la care placa reflectoare metalică a fost înlocuită cu o placă de cuarț identică cu cea emițătoare, care însă îndeplinește rolul de detector. Din acest motiv dispozitivul se numește *interferometru cu cristal dublu*. În acest caz, citirile experimentale se fac prin măsurarea diferențelor de potențial alternative care apar pe cuarțul receptor ca urmare a reacției coloanei de fluid, atunci când distanța dintre cele două cristale variază. La interferometrul conceput de N. L. Telesmin și V. A. Krasilnikov, receptorul piezoelectric este legat la una din pere-

chile plăcilor defletoare ale unui oscilograf, iar la cealaltă pereche de plăci este legat emițătorul piezoelectric. În felul acesta, pe ecranul oscilografului se obține ca figură a lui Lissajou o elipsă care-și va schimba poziția, se va roti, la schimbarea lină a distanței dintre plăci prin mișcarea receptorului, sau la schimbarea frecvenței oscilatorului. Măsurînd variația distanței Δl sau a frecvenței Δf , pentru un număr determinat de rotații complete ale elipsei, se poate deduce valoarea vitezei din relația

$$c_L = \frac{f \Delta l}{n} \quad \text{sau} \quad c_L = \frac{l \Delta f}{n} \quad (4.31)$$

în care n este numărul de rotații complete.

Practic, figurile Lissajou sînt deformate de undele staționare, ceea ce complică determinările. Pentru evitarea într-o oarecare măsură a efectului perturbator al undelor staționare, se introduce în interiorul interferometrului, aproximativ la jumătatea distanței dintre cele două cristale, o foaie subțire de cauciuc dispusă oblic față de direcția de propagare a undelor (fig. 4.17).

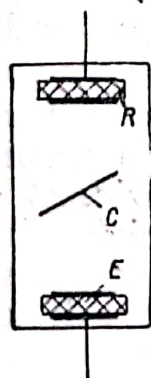


Fig. 4.17. Interferometru ultrasonic cu cristal dublu:

E — cristalul de cuarț emițător; R — cristalul de cuarț receptor; C — foaie de cauciuc.

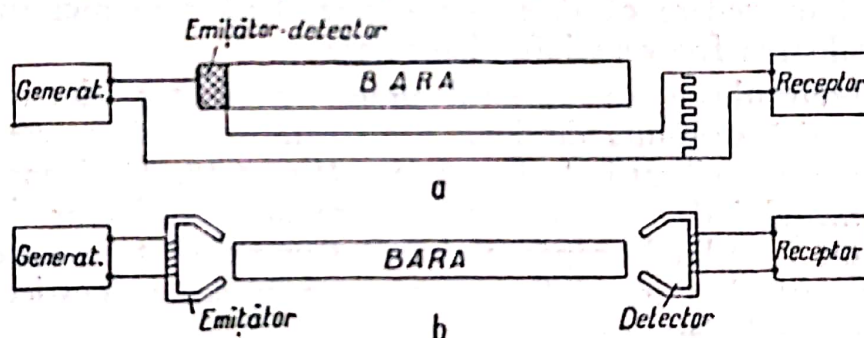


Fig. 4.18. Moduri de producere și de detectare a vibrațiilor longitudinale într-o bară:

a — cu transductor piezoelectric; b — cu transductor electromagnetic.

Metode de rezonanță. Sînt folosite pentru determinarea vitezei de propagare a unei acustice, atunci cînd aceasta se propagă printr-un mediu solid, sub formă de bară sau de placă. Sub acțiunea undelor emise continuu de către un transductor electromecanic corpul este pus în vibrație, vibrațiile generate putînd fi longitudinale, de încovoiere sau de răsucire. Prin variația frecvenței ultrasunetului excitator

se ajunge la rezonanță; cunoscîndu-se valoarea frecvenței de rezonanță și dimensiunile corpului în raport cu tipul de vibrații pe care le are corpul se poate calcula viteza de propagare a unei acustice.

Prin excitarea cu ajutorul unui transductor piezoelectric a unei bare care constituie epruveta, în ea au loc vibrații longitudinale (fig. 4.18, a).

Transductorul emițător îndeplinește și rolul de detector, dînd posibilitatea ca în urma variației frecvenței să se repereze momentul producerii rezonanței. Bara fiind supusă unui mod de vibrație longitudinal, între viteza undelor longitudinale prin materialul din care este constituită bara de lungime l și avînd frecvența fundamentalei f_0 există relația

$$c_L = 2l f_0. \quad (4.32)$$

În cazul în care nu poate fi pusă cu precizie în evidență frecvența fundamentală, se reperează două rezonanțe succesive, cărora le corespund frecvențele f_n și f_{n-1} . În acest caz, viteza de propagare a undelor longitudinale se calculează cu relația

$$c_L = 2l(f_n - f_{n-1}) \quad (4.33)$$

avînd în vedere că diferența dintre două armonici succesive este egală cu valoarea frecvenței fundamentale.

Excitîndu-se cu ajutorul unui transductor electromagnetic o bară prismatică susținută de două fire fixate în două puncte nodale în aceasta iau naștere vibrații de încovoiere (fig. 4,18, *b*). Punerea în evidență a fenomenului de rezonanță se face cu un transductor similar emițătorului montat la celălalt capăt al barei. Cunoșcînd frecvența de rezonanță se poate calcula viteza de propagare a undelor acustice longitudinale cu ajutorul relației

$$c_L = \frac{0,975 l^2}{d} f_0 \quad (4.34)$$

unde d este grosimea epruvetei.

Folosindu-se metodele de rezonanță se poate măsura viteza ultrasunetului cu o precizie de 10^{-5} , cu condiția ca frecvența proprie a transductorului emițător și a celui receptor să nu cadă în interiorul domeniului de măsurare.

Metode de impuls. Sînt metode de măsurare directă a vitezei de propagare a unei acustice folosind în acest scop un impuls ultrasonic care traversează mediul lichid sau solid în care este necesar să se cunoască mărimea acestei viteze.

Metoda de impuls prin transmisie utilizează două transductoare piezoelectrice, unul care emite impulsul și altul care îl detectează, transductoare

plasate în mediul fluid la o distanță cunoscută (l) sau la capetele unei bare cu fețele laterale perfect plane și paralele, avînd de asemenea o lungime cunoscută (l), în cazul cînd se măsoară viteza de propagare a undelor longitudinale într-un mediu solid. Transductorul receptor este conectat prin intermediul unui amplificator și redresor la plăcile verticale ale unui oscilograf catodic, pe ecranul căruia este pusă în evidență imaginea B a semnalului detectat. Generatorul de impulsuri este conectat la plăcile orizontale ale oscilografului catodic, făcînd să apară pe ecranul acestuia imaginea A a semnalului emis (fig. 4.19). Datorită întîrzierii apariției semnalului detectat față de cel emis, rezultată din propagarea unei ultrasonice în materialul epruvetei, imaginea sau vîrfurile B apare pe ecran la o oarecare distanță în raport cu vîrfurile A .

Dacă baza de timp a oscilografului este calibrată, se poate determina durata propagării impulsului (Δt) în mediul lichid sau în lungul barei, de la transductorul emițător la cel receptor, măsurîndu-se pe ecran distanța dintre imaginile A și B ale celor două semnale. Cunoscînd lungimea drumului parcurs și durata propagării impulsului, aplicînd relația (4.21) rezultă mărimea vitezei undelor longitudinale. Baza de timp poate fi calibrată fie prin alimentarea plăcilor verticale ale oscilografului cu un semnal produs de o sursă de frecvență standardizată, fie prin efectuarea unei măsurări prealabile printr-un mediu a cărui viteză de propagare a undelor acustice este cunoscută.

În cazul măsurării vitezei ultrasunetelor printr-un mediu solid, pentru asigurarea unui bun cuplaj între transductor și corpul solid, acesta poate fi imersat într-un lichid, la care se cunoaște viteza ultrasunetului. Metoda indicată de J. Wehr, constă din executarea mai întîi a unei măsurări prealabile în lichid (fig. 4.20, a), determinîndu-se, în lipsa corpului, intervalul de timp t_1 de propagare a unei unde prin pătura de lichid de grosime d , care separă cele două transductoare. Se repetă operația introducînd în pătura de lichid dintre transductoare corpul solid de grosime l .

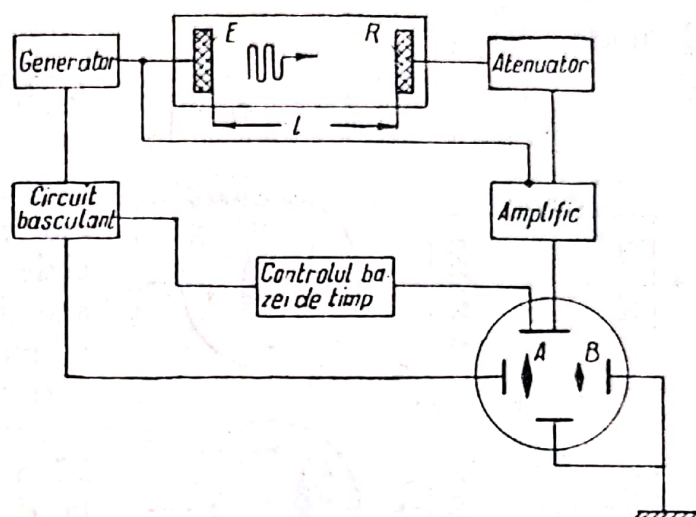


Fig. 4.19. Măsurarea vitezei ultrasunetelor prin metode de impuls.

Se determină un alt interval de timp t_2 ($t_2 < t_1$) de propagare a undei atât prin mediul lichid, cât și prin mediul solid (fig. 4.20, *b*). Notînd cu c_0 viteza de propagare a undei prin lichid, rezultă

$$t_1 = \frac{d}{c_0} \text{ și } t_2 = \frac{d-l}{c_0} + \frac{l}{c_L}$$

de unde

$$c_L = \left(\frac{1}{c_0} + \frac{t_2 - t_1}{l} \right)^{-1}. \quad (4.35)$$

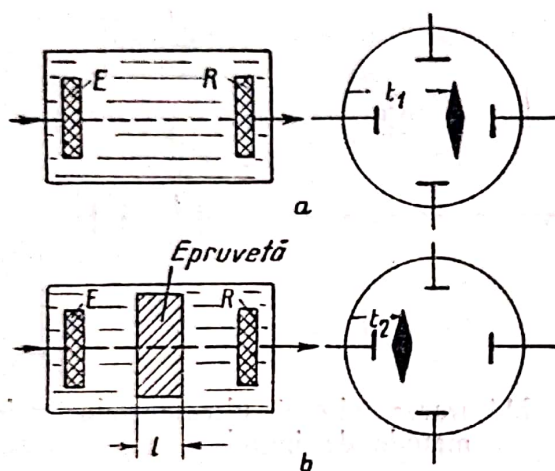


Fig. 4.20. Măsurarea vitezei ultrasunetelor în solide prin metode de impuls.

Pentru aplicarea acestei metode, este necesar să se cunoască cu precizie viteza de propagare a undelor acustice prin lichidul care servește ca mediu de cuplaj. În plus, în cazul corpurilor metalice, grosimea epruvetei trebuie să fie mai mare de 50 mm. Metoda se aplică în special la determinarea vitezei ultrasunetului prin materiale neomogene care prezintă o atenuare puternică a undelor acustice, însă nu este aplicabilă la materialele care prin imersiune își modifică starea sau unele constante fizice. În cazul unor materiale

omogene cu o bună transparentă ultrasonică (metale, sticlă, porțelan etc.), se folosește obișnuit metoda de impuls prin reflexie. Este necesar un singur transductor piezoelectric care îndeplinește alternativ funcția de emițător și de receptor de impulsuri ultrasonice. Metoda constă din determinarea intervalului de timp ($t_2 - t_1$) parcurs din momentul emisie impulsului, pînă în momentul recepționării în același punct, după reflexia pe suprafața epruvetei opusă aceleia pe care este fixat transductorul (fig. 4.21). De această dată, drumul parcurs de unda ultrasonică fiind $2l$, viteza ultrasunetului este

$$c_L = \frac{2l}{t_2 - t_1}. \quad (4.36)$$

Folosirea metodelor de impuls asigură o precizie în determinarea vitezei ultrasunetului pînă la 10^{-3} , deci inferioară celei obținută cu ajutorul metodelor de rezonanță. Datorită vitezei mari pe care o au undele longitudinale în corpurile solide, aplicarea acestor metode la medii solide este limitată, deoarece sînt necesare epruvete destul de lungi. Cu toate

acestea, metoda impulsului prezintă avantaje în cazul studiului unor materiale policristaline și a sticlei, când se folosesc ultrasunete avînd frecvența cuprinsă între 2—10 MHz.

Precizia determinării vitezei prin aplicarea metodelor de impuls este condiționată de valoarea frecvenței de repetare a impulsurilor și de durata acestora. Este necesar să se aleagă pentru frecvența de repetare o asemenea valoare încît un impuls, după parcurgerea traseului destinat să-l efectueze prin mediu, să fie complet atenuat înainte ca următorul impuls să înceapă să se propage. În caz contrar, se produce o suprapunere de semnale care prin crearea de confuzii, reduce precizia determinării. Valoarea frecvenței de repetare se stabilește în raport cu mărimea vitezei de propagare a undelor în mediul care se experimentează, cu gradul de atenuare al undelor prin acest mediu și cu raportul semnal/zgomot, corespunzător oscilografului catodic întrebuintat.

În ceea ce privește durata impulsului, este necesar ca la determinările de viteză la care se cere un grad înalt de precizie, aceasta să fie cît mai scurtă, lucru care se poate realiza prin folosirea unui emițător cu o amortizare ridicată.

Pentru a se obține o precizie mare în cazul măsurărilor de viteză în corpuri solide se poate utiliza o metodă tot de impuls bazată pe compararea fazelor semnalelor a două ecouri succesive. La unul din capetele epruvetei este fixat transductorul piezoelectric, care are rolul atît de emițător cît și de receptor de impulsuri. Un impuls emis în interiorul corpului va suferi o serie de reflexii de ambele suprafețe laterale ale acestuia (fig. 4.22). Neglijînd atenuarea suferită de unde în propagarea sa prin mediul solid, între tensiunile de eșire produse de două ecouri succesive care ajung în dreptul feței transductorului există relația

$$E' = E \rho_R e^{j\theta} e^{-jk_2 l}$$

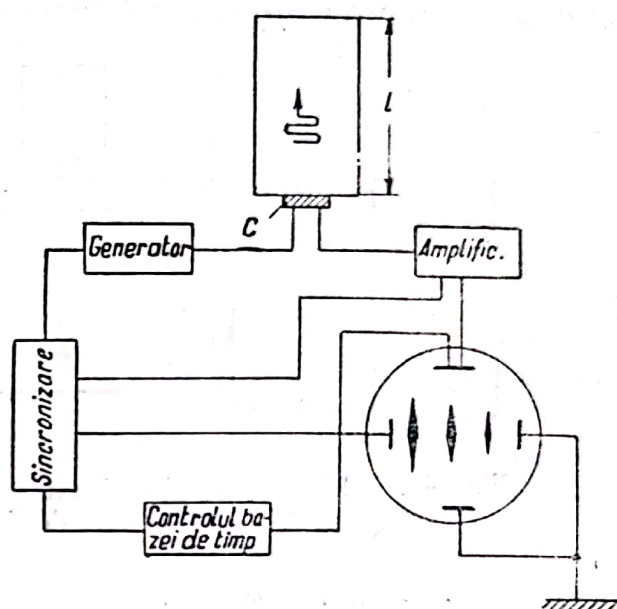


Fig. 4.21. Măsurarea vitezei ultrasunetelor în solide prin metode de impuls prin reflexie.

unde E este tensiunea electrică a primului semnal recepționat, E' tensiunea electrică a celui de-al doilea semnal, $\rho e^{j\theta}$ coeficientul de reflexie complex corespunzător reflexiei undei de suprafața corpului opusă celei unde este fixat transductorul, iar l lungimea epruvetei.

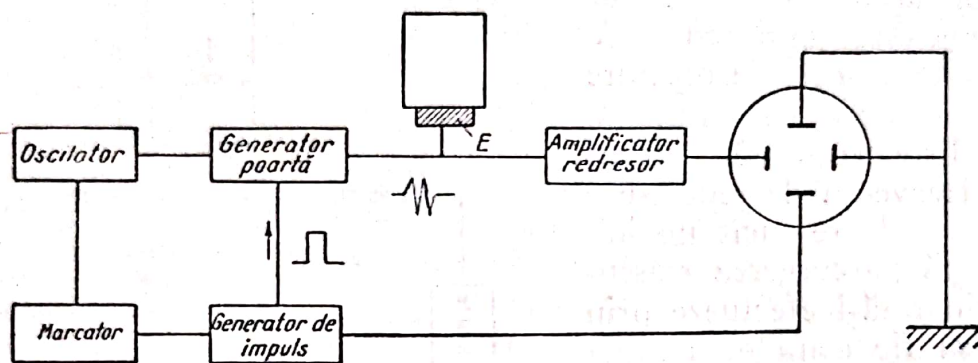


Fig. 4.22. Măsurarea vitezei ultrasunetelor prin metoda comparației de fază.

Cunoscând că $k = \frac{\omega}{c}$, printr-o modificare a frecvenței, se poate ajunge ca ambele ecouri să fie în fază. Relația de condiție este

$$\theta - \frac{2l\omega_n}{c} = -2\pi n \quad (4.37)$$

în care n este un număr întreg, iar ω_n este pulsația corespunzătoare frecvenței la care se produce egalitatea de fază.

Din expresia (4.37) se poate deduce viteza de propagare a undelor longitudinale prin mediul considerat și anume

$$c_L = \frac{2lf_n}{n + \theta/2\pi} \quad (4.38)$$

Aplicarea acestei metode presupune cunoscut unghiul θ care pune în evidență defazarea ce are loc în momentul reflexiei undei pe suprafața de separare a mediilor. În majoritatea cazurilor, însă, valoarea lui θ este foarte mică și se poate neglija, atunci când nu se cere o precizie prea mare a măsurătorilor. Metoda permite măsurarea vitezei în probe foarte subțiri, pînă la 2 mm grosime, iar folosirea ultrasunetelor de frecvență ridicată dă posibilitatea să fie eliminate erorile datorite difracției și cuplajului dintre transductor și epruvetă.

Metodele de impuls prin reflexie permit să se măsoare și viteza de propagare a undelor transversale printr-un mediu solid. În acest scop se

folosesc palpatoare înclinate de un unghi superior primului unghi critic, definit de relația (1.59). Notînd cu l_T distanța parcursă de unda acustică pentru a ajunge din punctul emisiei în punctul recepționării, după reflexia de suprafața epruvetei opusă celeia pe care sînt fixate palpatoarele și cu $t_2 - t_1$, intervalul de timp necesar parcurgerii acestei distanțe rezultă:

$$c_T = \frac{l_T}{t_2 - t_1} \quad (4.39)$$

Viteza de propagare a undelor transversale se mai poate determina prin folosirea unei variante a acestei metode, care constă din variația înclinării palpatorului în urma căreia se măsoară primul și cel de-al doilea unghi critic (fig. 4.23). Ținînd seama de relațiile (1.59) și (1.60) se poate scrie

$$\frac{\sin \theta_{cr1}}{\sin \theta_{cr2}} = \frac{c_T}{c_L}$$

de unde

$$c_T = c_L \frac{\sin \theta_{cr1}}{\sin \theta_{cr2}} \quad (4.40)$$

Aplicarea acestei metode presupune cunoscută viteza de propagare a undelor longitudinale prin mediul care se examinează.

4.2.2. Măsurarea atenuării undelor longitudinale. În raport cu felul undei acustice folosite, metodele pentru determinarea constantei de atenuare pot fi grupate în două mari categorii. Metode cu unde continue și metode de impuls. În prima grupă intră metoda presiunii de radiație, metoda interferometrului ultrasonic, metodele optice, metoda calorimetrică etc.

Metoda presiunii de radiație. S-a arătat la § 1.8 că atunci cînd un fascicul de unde ultrasonice este incident pe o suprafață, se exercită pe aceasta o presiune, numită presiune de radiație, care este proporțională cu intensitatea acustică corespunzătoare undei. Măsurînd cu ajutorul unui radiometru presiunea de radiație Π_1 și Π_2 în două puncte aflate la distanțele x_1 și x_2 ($x_2 > x_1$) de un reper luat ca origine, se poate scrie

$$\Pi_2 = \Pi_1 e^{-2\alpha(x_2 - x_1)}$$

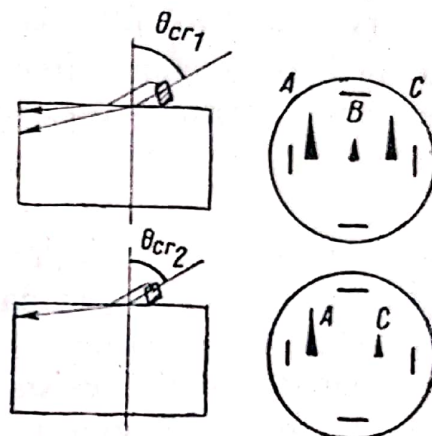


Fig. 4.23. Măsurarea vitezei de propagare a undelor transversale prin metoda de impuls prin reflexie.

de unde constanta de atenuare este dată de relația

$$\alpha = \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \frac{\Pi_1}{\Pi_2} \quad (4.41)$$

Dacă este posibil a se efectua măsurarea presiunii de radiație acustică în mai multe puncte în mediu, aflate la diferite distanțe x față de sursă, se poate determina o expresie a presiunii de radiație în funcție de x

$$\ln \Pi_x = \ln \Pi_0 - 2\alpha x \quad (4.42)$$

observându-se o variație liniară a logaritmului presiunii în funcție de distanța x , iar din înclinarea drepte se poate obține valoarea constantei de atenuare.

Metoda implică existența unor unde progresive și este necesar să fie evitată formarea unor unde staționare. Această condiție este îndeplinită dacă suprafața radiometrului este perfect absorbantă sau în cazul când reflectă undele acustice, ea trebuie să aibă o formă ca să permită dirijarea undelor într-o altă direcție decât cea a undelor incidente. Datorită densității reduse a gazelor care face ca valorile presiunii de radiație să fie scăzute, metoda se aplică numai pentru măsurarea atenuării undelor în medii lichide, și chiar și în acest caz trebuie întrebuințate ultrasunete de intensități mari. Pentru emiterea undelor se folosește în mod obișnuit un transductor piezoelectric. S-au obținut valori ale constantei de atenuare a undelor în apă, cu o abatere mai mică de 5% utilizând ultrasunete având frecvența cuprinsă între 12 și 40 MHz.

În gaze, determinarea constantei de atenuare se face obișnuit prin măsurarea presiunii acustice cu ajutorul unui microfon și prin aplicarea relației (1.99).

Metoda interferometrului ultrasonic. Interferometrul ultrasonic cu ajutorul căruia s-a determinat viteza de propagare a undelor printr-un mediu fluid, permite măsurarea și a constantei de atenuare a undei. În expresiile (4.27) și (4.28) care dau intensitatea maximă și minimă a curentului electric intră și constanta de atenuare, astfel încât folosind una din aceste relații s-ar putea calcula valoarea acestei constante. Un calcul direct este dificil de efectuat deoarece în cele două relații intră o serie de mărimi necunoscute care caracterizează instalația de măsurare (rezistența electrică a circuitului, rezistența datorită pierderilor în cristal, coeficientul de transformare electromecanică, coeficientul de reflexie corespunzător suprafeței reflectante). Pentru a avea posibilitatea eliminării acestor

mărimi, se procedează la efectuarea unor măsurători suplimentare a curentului în cazul particular când l tinde către 0. În acest caz, se obține

$$I_M = \lim_{l \rightarrow 0} I_{max} = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{\omega^2 C_0^2 \left(R_l + \frac{\rho c S}{4 \beta^2} \frac{1 + \rho R}{1 - \rho R} \right)}} \quad (4.43)$$

și

$$I_m = \lim_{l \rightarrow 0} I_{min} = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{\omega^2 C_0^2 \left(R_l + \frac{\rho c S}{4 \beta^2} \frac{1 - \rho R}{1 + \rho R} \right)}} \quad (4.44)$$

Eliminând parametrii necunoscuți în expresiile (4.27), (4.28), (4.42) și (4.43) se obține o expresie care permite calculul constantei de atenuare în funcție de mărimile măsurate. Astfel:

$$\operatorname{th}^2 \alpha l = \frac{(I_M - I_{max})(I_{min} - I_m)}{(I_M - I_{min})(I_{max} - I_m)} \quad (4.45)$$

Metoda interferometrului ultrasonic asigură o precizie satisfăcătoare în cazul măsurărilor în lichide. Pentru gaze determinarea constantei de atenuare cu ajutorul relației (4.45) este puțin indicată, deoarece în asemenea medii la care impedanța caracteristică este redusă, diferența între I_m și I_{min} este foarte mică. În acest caz, dacă instalația permite, se măsoară intensitatea curentului cu reflectorul îndepărtat ($l \rightarrow \infty$), obținându-se

$$I_\infty = \lim_{l \rightarrow \infty} I_{max} = \lim_{l \rightarrow \infty} I_{min} = \frac{V_0}{R_0 + \frac{1}{\omega^2 C_0^2 \left(R_l + \frac{\rho c S}{4 \beta^2} \right)}} \quad (4.46)$$

iar expresia care permite calculul constantei de atenuare este

$$e^{\alpha l} \operatorname{sh}(\alpha l) = \operatorname{Const.} \frac{I_M - I_{max}}{I_{max} - I_\alpha} \quad (4.47)$$

La efectuarea măsurărilor de viteză sau de absorbție, intervin o serie de dificultăți datorită pe de o parte deformărilor ce apar în curbele de reacție și pe de altă parte prezenței impurităților în mediul care se examinează. Pielmeier a semnalat prezența unor vîrfuri suplimentare, așa numiții „sateliți” care cauzează o deformare a curbei de reacție și prin acestea fiind lipsa unui paralelism perfect între suprafețele reflectante ale (fig. 4.24). Apariția acestor sateliți s-ar datora mai multor cauze, una din aceasta fiind lipsa unui paralelism perfect între suprafețele reflectante ale emițătorului și reflectorului. Această lipsă de paralelism face ca lungimea traiectului acustic să nu mai fie aceeași pentru toate razele din cuprinsul

fascicolului. Efectul lipsei de paralelism poate fi măsurat prin alegerea unei distanțe mai reduse între cele două suprafețe reflectante.

O altă cauză a apariției sateliților în curbele de reacție este neregularitatea în vibrația elementului piezoelectric, ca urmare a lipsei unei stabi-

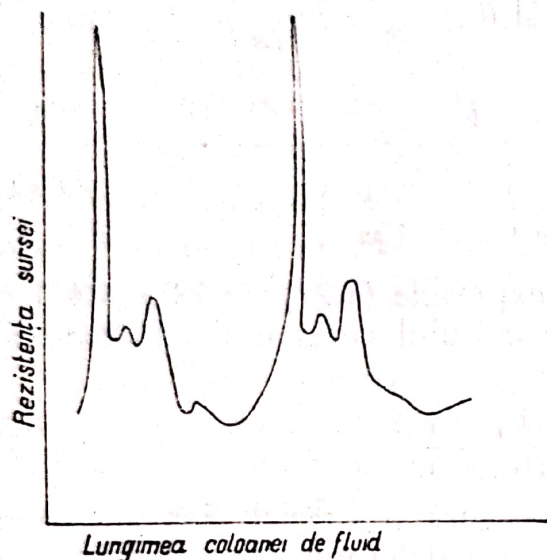


Fig. 4.24. Deformarea curbei de reacție prin apariția de vîrfuri suplimentare.

lități a frecvenței precum și apariției armonicilor. Acest efect poate fi prevenit printr-un montaj corect al cristalului piezoelectric și prin dozarea curentului electric astfel ca să nu suprasolicite cristalul. În plus, este indicat ca dintr-un număr mai mare de cristale să fie ales acela care se dovedește experimental mai corespunzător.

Deformațiile în curbele de reacție mai pot proveni și din cauza difracției undelor ultrasonice. Efectele difracției pot fi micșorate, dacă se folosesc discuri de cristal cu diametrul suficient de mare, de cel puțin 50 ori mai mare ca lungimea de undă în lichidul examinat.

Erori în determinarea mărimilor ce se măsoară cu ajutorul interferometrului ultrasonic pot proveni din cauza impurităților în mediu. Acestea afectează în special măsurarea constantei de atenuare, a cărei valoare poate fi complet diferită de cea corespunzătoare aceluiaș gaz în stare pură. Impuritățile pot exista în gazul aflat în interiorul cilindrului interferometrului datorită:

- imposibilității de efectuat o purificare 100% a gazului;
- contaminării gazului de către materialele din care este confecționat interferometrul, în urma procesului chimic care poate avea loc între aceste materiale și gazul ce se experimentează;
- infiltrării de gaze în interiorul cilindrului interferometrului pe timpul măsurărilor, din cauza lipsei unei etanșietăți perfecte, în special în zonele cu piese în mișcare.

În fine, o altă sursă de erori provine din absorbția datorită frecării moleculelor fluidului de pereții cilindrului interferometrului, efect mai pregnant în cazul frecvențelor înalte. Însă, acest efect poate deveni important și la frecvențe mai reduse ale ultrasunetelor, atunci cînd diametrul cilindrului interferometrului nu este suficient de mare în raport cu lungimea de undă în fluid.

Metoda reverberației, permite măsurarea constantei de atenuare a undelor acustice într-un lichid. Principiul metodei este acelaș cu măsurarea duratei de reverberație într-o încăpăre. Într-un vas de formă sferică sau cilindrică, umplut cu lichidul care se examinează, se emit unde acustice avînd frecvența egală cu una din frecvențele proprii ale vasului. Emițătorul, este constituit dintr-un transductor piezoelectric montat pe peretele vasului. Un transductor similar este folosit ca receptor. După stabilirea unui regim staționar în interiorul vasului, se întrerupe emițătorul, iar descreșterea semnalului ultrasonic recepționat poate fi urmărită pe ecranul unui osciloscop catodic (fig. 4.25). Evaluîndu-se timpul T de descreștere a semnalului de la intensitatea I_0 la intensitatea I , ca urmare a atenuării undei în mediul considerat, din relația

$$I = I_0 e^{-2(K+\alpha c)T} \quad (4.47')$$

în care K este o constantă care ține seama de pierderile de energie acustică cauzate de absorbția pereților vasului și transductoarelor și de efectele vîscoase de la suprafața interioară a vasului, se poate deduce constanta de atenuare

$$\alpha = \frac{1}{Tc} \ln \frac{I_0}{I} - \frac{2K}{c}. \quad (4.48)$$

Ținînd seama că în cazul unor recipiente de mărime obișnuită, la frecvențe mai mari de 50 kHz există un foarte mare număr de frecvențe proprii ale vasului, mult prea apropiate una de alta pentru a putea fi excitate în mod individual, metoda așa cum a fost descrisă mai sus se aplică numai în domeniul frecvențelor joase ale ultrasunetelor. Se pot utiliza totuși și ultrasunete de frecvențe mai mari de 50 kHz, în care caz se excită simultan un număr oarecare de moduri de vibrație care se presupune că au o aceeași durată de amortizare. Se aplică de această dată emițătorului semnale modulate în frecvență, asemănătoare sunetelor

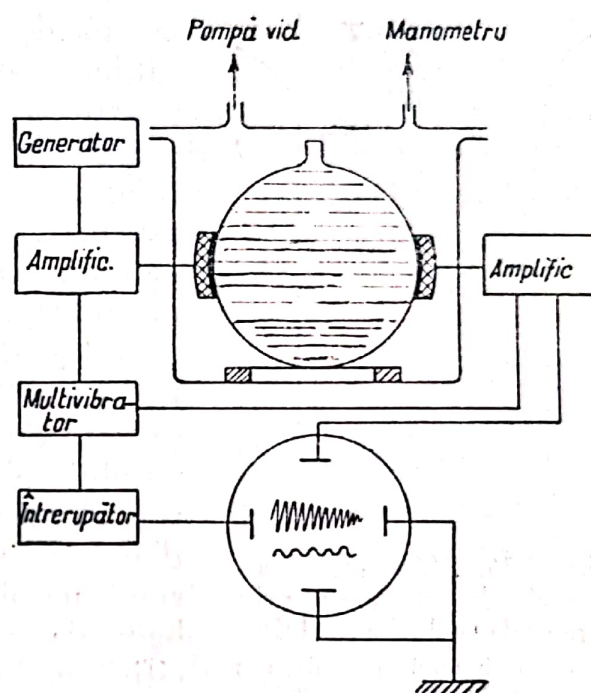


Fig. 4.25. Măsurarea constantei de atenuare prin metoda reverberației.

vobulate utilizate pentru măsurările de reverberație în săli. Prin folosirea ultrasunetelor de frecvențe ridicate, din domeniul 200 kHz — 2 MHz, nu este necesar ca recipientul umplut cu lichid să aibă o capacitate prea mare; este suficient un vas cu o capacitate în jur de 0,5 l.

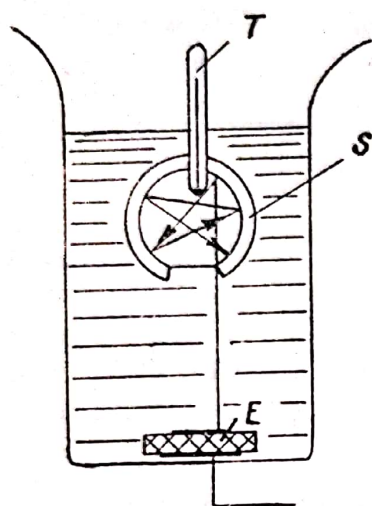


Fig. 4.26. Măsurarea constantei de atenuare prin metoda calorimetrului:

E — emițătorul piezoelectric;
S — emisferă; T — termometru.

Metoda calorimetrului. Se bazează pe fenomenul de transformare a energiei acustice în căldură, atunci când unda străbate un mediu în care are loc o absorbție puternică a acestei energii. În urma acestui proces se realizează o ridicare a temperaturii mediului care poate fi măsurată cu ajutorul unui termometru. Metoda permite măsurarea constantei de atenuare corespunzătoare unui lichid.

Dispozitivul de măsurare este arătat în fig. 4.26. Se compune dintr-un recipient în care se introduce lichidul de examinat pe fundul vasului găsimd-se emițătorul ultrasonic, un transductor piezoelectric. Undele acustice radiate de emițător sînt captate într-o mică emisferă umplută cu un material puternic absorbant de sunet, avînd masa M și căldura specifică q . În interiorul emisferei se introduce un termometru, care are posibilitatea să măsoare temperatura substanței absorbante. Notînd cu A echivalentul mecanic al căldurii, cantitatea de căldură produsă în unitatea de timp ca urmare a radiației emițătorului este

$$Q = \frac{I}{A} = \frac{q M \Delta T}{A}$$

unde I este intensitatea acustică, ΔT variația temperaturii înregistrată.

Efectuîndu-se două determinări, în două poziții diferite ale emisferei, definite prin distanțele x_1 și x_2 față de emițător, prin aplicarea unei relații echivalente cu (1.108)

$$Q_x = Q_0 e^{-2\alpha x}$$

se obține mărimea constantei de atenuare a undei acustice prin lichidul care umple recipientul

$$\alpha = \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \quad (4.49)$$

Pentru a se elimina orice pierderi de căldură prin pereții semisferei, aceasta se confecționează cu pereții dubli, izolați termic, ca un calorimetru, pătrunderea fasciculului ultrasonic făcându-se printr-o mică fereastră închisă cu o folie subțire. Partasarathy, care a conceput această metodă, a folosit ultrasunete având frecvența de 5 MHz.

Metode cu impulsuri. Permit măsurarea constantei de atenuare atât în medii lichide, cât și în medii solide, utilizând în acest scop un impuls ultrasonic care traversează mediul ce se examinează. Unda ultrasonică suferă o atenuare, mărimile presiunii acustice ale impulsului după parcurgerea diferitelor distanțe fiind proporționale cu amplitudinile imaginilor semnalelor apărute pe ecranul osciloscopului catodic. Având posibilitatea măsurării acestor amplitudini se poate calcula constanta de atenuare aplicând relația

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (4.50)$$

unde A_x este amplitudinea semnalului după parcurgerea unui traseu de lungime x în mediu, A_0 amplitudinea semnalului la intrarea în mediu.

Întocmai ca în cazul măsurării vitezei de propagare a unde acustice printr-un mediu, și în cazul determinării constantei de atenuare poate fi utilizată fie metoda transmisiei, fie metoda reflexiei sau a ecourilor multiple. Aplicarea metodei transmisiei necesită două transductoare, unul emițător și altul receptor, plasate într-un mediu lichid la distanța l sau la capetele epruvetei, la măsurarea atenuării în medii solide. Făcând să apară pe ecranul osciloscopului catodic semnalele impulsului emis și a celui recepționat după parcurgerea distanței l prin mediu, din relația (4.50) se poate calcula constanta de atenuare

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln \frac{A_0}{A_l}. \quad (4.51)$$

În cazul metodei reflexiei se utilizează un singur transductor plasat la un capăt al corpului. Acesta îndeplinește atât rolul unui emițător, care emite în corpul de examinat un impuls ultrasonic, cât și a unui receptor care recepționează ecourile succesive, rezultate în urma reflexiei impulsurilor pe suprafața corpului, opusă celei pe care se găsește palpatorul. Imaginile care apar pe ecranul osciloscopului catodic, corespunzătoare ecourilor repetate, au amplitudinile din ce în ce mai mici, în caz ideal înfășurătoarea acestor semnale fiind o funcție exponențială. Măsurând amplitudinile A_n și A_{n-1} a două semnale succesive se poate determina constanta de atenuare din relația

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{A_{n-1}}{A_n} \quad (4.52)$$

iar dacă se măsoară amplitudinea primului semnal A_1 și a celui de al n -lea semnal A_n , constanta de atenuare rezultă din relația

$$\alpha = \frac{1}{2(n-1)l} \ln \frac{A_1}{A_n}. \quad (4.53)$$

În practică, determinarea constantei de atenuare este afectată de o serie de erori, deoarece curba de descreștere a amplitudinilor ecourilor repetate nu este o exponențială perfectă, apărînd pe ecranul osciloscopului și unele vîrfuri perturbatoare. Aceste erori pot fi provocate de neparalelismul perfect între suprafețele reflectante ale epruvetei, de divergența fascicolului ultrasonic în cîmp depărtat, de vibrația transductorului diferită de cea a unui piston rigid, precum și pierderilor de energie cauzate de absorbția acustică în cristalul emițătorului și de cuplarea transductorului cu corpul ce se examinează. Pentru reducerea cît mai mult a acestor efecte este indicat să se folosească unde ultrasonice de frecvență coborîță și să se lucreze în cîmp apropiat.

În cazul măsurării atenuării undelor ultrasonice într-un corp solid, pentru a se asigura un cuplaj cît mai bun între transductor și corpul de examinat, între acestea se interpune un strat gros de lichid sau corpul se cufundă într-un lichid în interiorul căruia se găsește transductorul. Dacă epruveta nu este acoperită în totalitatea ei de lichid, datorită aerului de la suprafața superioară a corpului unde acustice nu se transmit în aer, fiind reflectate complet de către această suprafață. În consecință, pier-

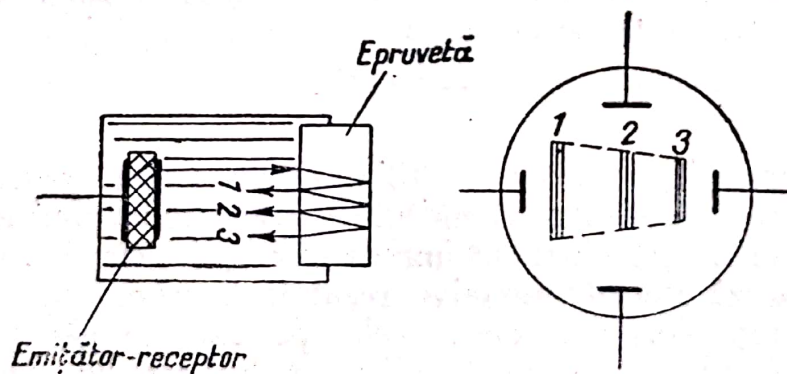


Fig. 4.27. Măsurarea constantei de atenuare prin metoda de impuls.

derile de energie acustică rezultă în urma atenuării undei în propagarea prin lichid, prin corpul de examinat și în urma reflexiilor produse la suprafața de separare dintre mediul lichid și cel solid (fig. 4.27). Pe ecran-

nul osciloscopului catodic vor apare imaginile ecourilor repetate produse în urma reflexiilor de suprafața interioară și superioară a corpului care se examinează. Diferența dintre amplitudinile A_1 și A_2 a două semnale succesive este datorită pierderilor prin transmisia energiei acustice din mediul solid în lichid și prin atenuarea în corpul solid, caracterizată prin constanta de atenuare α . Astfel

$$\alpha = \frac{1}{2l} \left(20 \lg \frac{A_1}{A_2} - 20 \lg \frac{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1} \right) \quad (4.54)$$

unde l este grosimea corpului care se examinează, iar $\rho_1 c_1$ și $\rho_2 c_2$ impedanțele caracteristice ale lichidului și mediului solid.

Relația (4.54) este valabilă atîta timp cît distanța $(l + l_0)$ nu este prea mare, astfel încît măsurătoarea să se considere executată în cîmp acustic apropiat.

În cazul în care corpul solid este imersat complet într-un lichid se folosește un dispozitiv cu două transductoare, unul emițător și al doilea receptor (fig. 4.28). Executîndu-se o primă măsurare în absența corpului solid, pe ecranul osciloscopului catodic se obține imaginea semnalului recepționat A_1 . Introducîndu-se corpul care se examinează în lichid, în urma transmiterii impulsului prin acest corp și a reflexiilor ce se produc se obțin pe ecranul osciloscopului catodic imaginile A_2 și A_3 . Constanta de atenuare se poate determina din relația

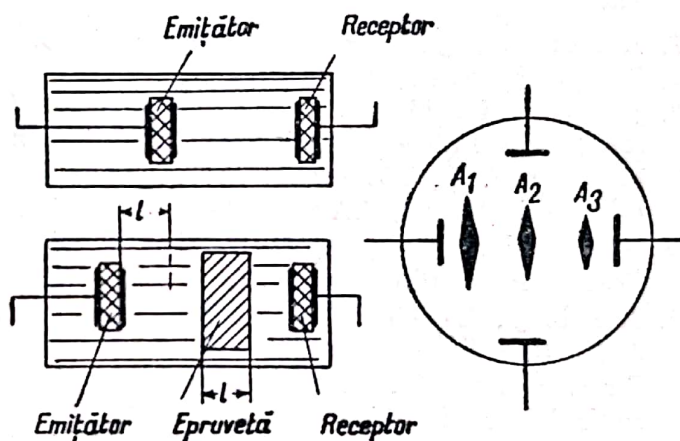


Fig. 4.28. Măsurarea constantei de atenuare într-un corp solid imersat, prin metoda de impuls.

$$\alpha = \frac{20}{l} \lg \frac{2}{\frac{A_2}{A_1} + \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + 4 \left(\frac{A_3}{A_1}\right)}} \quad (4.55)$$

Relația (4.55) este valabilă numai dacă traiectul impulsului prin lichid este menținut constant în ambele faze ale măsurării și dacă se lucrează în cîmp acustic apropiat.

BIBLIOGRAFIE

1. Eisenmenger, W., *Eine Kontrollschallquelle für breitbandige Mikrofone zur Messung von Druckimpulsen in Flüssigkeiten*, *Acustica*, 12, 3, 165, 1962.
2. Eisenmenger, W., *Experimentelle Bestimmung der Stossfrontdicke aus dem akustischen Frequenzspektrum elektromagnetisch erzeugten Stosswellen in Flüssigkeiten*, *Acustica*, 14, 4, 187—204, 1964.
3. Romanenko, E. V., *Miniatiurniye piezoelektricheskie priomniki ultrazvuka*, *Akusticeski jurnal*, 2, 4, 342—347, 1957.
4. Stewart, J. L., Stewart, E. S., *Hypersonic Resonance of Quartz at 3500 MHz*, *J.A.S.A.*, 33, 4, 538, 1961.
5. Dünn, F., Breyer, J. E., *Generation and Detection of Ultrahigh Frequency Sound in Liquids*, *J.A.S.A.*, 34, 6, 375—378, 1962.
6. Filipczynski, L., *Method for Intensity Measurements of Ultrasonic Transverse and Longitudinal Waves*, *Al V-lea Congres Internațional de Acustică*, Liège, 1965.
7. Awatani, J., *Anomalous Behaviour of Rayleigh Disc for High Frequency Waves*, *J.A.S.A.*, 28, 2, 297—301, 1956.
8. Jensen, H. H., Saermark, K., *On the Theory of the Rayleigh-Disc and the Sound Pressure Radiometer*, *Acustica*, 8, 2, 79—86, 1958.
9. Murty, J. S., *Theoretical Investigation on the Diffraction of Light by Superpos. Ultrasonic Waves*, *J.A.S.A.*, 26, 6, 970—974, 1954.
10. Ramachandra, B., *Diffraction of Light by very High Frequency Ultrasonic Waves*, *Proc. Phys. Soc.*, 77, 5, 958—964, 1961.
11. Kolb, J., Loeber, A. P., *The Study of a Sound Field by Means of Optical Refraction Effects*, *J.A.S.A.*, 26, 2, 249—251, 1954.
12. Breazeale, M. A., Hiedemann, E. A., *Investigation of Progressive Ultrasonic Waves by Light Refraction*, *J.A.S.A.*, 30, 8, 751—756, 1958.
13. Breazeale, M. A., *Optical Methods for the Measurement of the Sound Pressure in Liquids*, *J.A.S.A.*, 31, 1, 24—28, 1959.
14. Litovitz, T. A., *Ultrasonic Spectroscopy in Liquids*, *J.A.S.A.*, 31, 6, 681—691, 1959.
15. Hargrove, L. E., *Effects of a Progressive Ultrasonic Wave on a Light Beam*, *J.A.S.A.*, 31, 10, 1366—1371, 1959.
16. Weeks, R. F., *Optical Measurement of Ultrasonic Fields*, *J.A.S.A.*, 33, 6, 741—747, 1961.
17. Liben, W., *Some Applications of an Ultrasonic Light Modulator*, *J.A.S.A.*, 34, 6, 860—861, 1962.
18. Zankel, K. L., Colbert, H. M., *Time Dependent Optical Methods for the Study of Ultrasonic Waves*, *Al IV-lea Congres Internațional de Acustică*, Copenhaga, 1962.
19. Loeber, A. P., Hiedemann, E. A., *Investigation of Stationary U.S. Waves by Light Refraction*, *J.A.S.A.*, 28, 1, 27—35, 1956.
20. Klein, W. R., *Light Diffraction by Ultrasonic Beam of High Frequency Near Bragg Incidence*, *Al IV-lea Congres Internațional de Acustică*, Liège, 1965.
21. Mihailoc, I. G., Sutilov, V. A., *Difrakția sveta na ultrazvukovih volnab bolșoi amplitudi*, *Akusticeski jurnal*, 4, 2, 174—183, 1958.

22. Zverev, V. A., Kalaciev, A. I., *Izmerenie vzaimodeistva zvukovih voln v jidkostiah*, Akusticeski jurnal, 4, 4, 321—324, 1958.
23. Freenov, F. E., Lloyd, E. A., *The Measurement of Liquid Borne Ultrasonic Power*, Al IV-lea Congres Internațional de Acustică, Copenhaga, 1962.
24. Bennet, G. S., *A New Method for the Visualization and Measurement of U.S. Field*, J.A.S.A., 24, 6, 718—720, 1952.
25. Wehr, J., *Classification and Discussion of Interference Methods for Measuring the Propagation Velocity of Ultrasonic Waves*, Al IV-lea Congres Internațional de Acustică, Copenhaga, 1962.
26. Litzler, R., Cerf, R., *Mesures d'absorption dans les liquides par interférométrie ultrasonore*, Al III-lea Congres Internațional de Acustică, Stuttgart, 1959.
27. Merculov, A. G., *Issledovanie rasseiania ultrazvuka v metallu*, Jurnal tehn. fiziki, 26, 1, 64—75, 1956.
28. Hilf, A., Naumescu, M., *Interferometrul ultrasonic*, Studii și Cercet. de fizică, 6, 4, 801—830, 1955.
29. Borgnis, F. E., *Theory of the Acoustic Interferometer for Plane Waves*, Acustica, 7, 3, 151—170, 1957.
30. Kozłowski, Z., Wehr, J., *Interferometryczne metody ultradźwiękowych badan plynnych metali*, Zestyty Problemowe Nauki Polskiej, 24, 272—282, 1965.
31. Bell, J. F. W., *A Fixed Path Ultrasonic Interferometer for Absorption Measurement in Gases*, Journ. Acoustic Soc. of America, 25, 1, 96—100, 1953.
32. Borgnis, F. E., *On the Theory of the Fixed Path Acoustic Interferometer*, J.A.S.A., 24, 1, 19—21, 1952.
33. McConnell, R. A., Mruk, W. F., *Microacoustic Interferometer Using 30 MC Pulses*, J.A.S.A., 27, 4, 672—676, 1955.
34. Herman I., Leon, *Fixed Path Variable Frequency Acoustic Interferometer*, J.A.S.A., 27, 6, 1107—1112, 1955.
35. Musa, R. S., *Two Crystal Interferometric Method for Measuring Ultrasonic Absorbtion Coefficient*, J.A.S.A., 30, 3, 215—219, 1958.
36. Soloviev, V. A., *K teorii ultrazvukovogo interferometra*, Akusticeski jurnal, 2 3, p. 285—290, (1956).
37. Bașlașev, Iu. A. ș.a., *Interferometr s dvumia generiruișimi kristallami*, Akusticeski jurnal, 8, 4, 412—414, 1962.
38. Krasnușkii, P. E., *Teoria ultrazvukovogo interferometra*, Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 27, 213, 1940.
39. Fry, W. J., *The Double Crystal Acoustic Interferometer*, J.A.S.A., 21, 1, 17—28, 1949.
40. Willard, G. A., *Methods for Measuring Ultrasonic Velocity*, Jurnal Acoustic, Soc. America, 23, 1, 83, 1951.
41. Andrae, J. H. ș.a., *Pulse Techniques for Measuring Ultrasonic Absorbtion in Liquids*, Acustica, 8, 3, 131—142, 1958.
42. Andrae, J. H., Edmonds, P. D., *Developments in the Techniques for Measuring Ultrasonic Absorbtion in Liquids*, Al III-lea Congres Internațional de Acustică, Stuttgart, 1959.

APLICAȚIILE ULTRASUNETELOR ÎN TEHNICĂ

5.1. GENERALITĂȚI

Aplicațiile numeroase ale ultrasunetelor în diverse ramuri ale tehnicii se datoresc efectelor produse de acestea ca urmare a proprietăților pe care le posedă undele ultrasonice (lungime de undă mică, accelerație a particulei foarte mare putînd atinge 10^5 accelerația gravitației, posibilitate de dirijare a unui fascicol ultrasonic îngust în direcția dorită, concentrare a energiei acustice într-un spațiu limitat), precum și a fenomenelor legate de propagarea lor, printre care în primul rînd se situează cavitația.

După modul în care ultrasunetele intervin în diferite procese tehnice în care sînt folosite, aplicațiile pot fi grupate în două mari categorii.

În prima grupă pot fi cuprinse aplicațiile în care energia acustică pusă în joc este suficient de mare pentru a produce modificări în structura mediului prin care se propagă undele. În acest caz, ultrasunetul are rolul unei unelte care efectuează un lucru mecanic. Datorită faptului că în aceste aplicații ultrasunetul intervine în mod activ, ele au fost denumite și aplicații active.

În a doua grupă pot fi cuprinse aplicațiile în care ultrasunetul de intensități relativ scăzute nu are puterea să producă modificări în structura mediului, ci are rolul unui agent fizic care procură informații referitoare la proprietățile, dimensiunile sau calitatea substanței examinate. Aplicațiile din această categorie au primit denumirea de aplicații pasive.

În cele ce urmează vor fi dezvoltate unele aplicații active și pasive ale ultrasunetelor, care și-au găsit întrebuințare curentă în industria metalurgică și constructoare de mașini, în industria textilă, chimică și farmaceutică, în industria construcțiilor și materialelor de construcții etc.

5.2. APLICAȚII ACTIVE ÎN TEHNICĂ

5.2.1. Prelucrarea mecanică cu ajutorul ultrasunetelor. Prelucrarea cu ajutorul ultrasunetelor a pieselor în general și a celor confecționate din materiale dure și casante în special, constituie un procedeu verificat în practică și care se aplică pe scară tot mai largă. Aceasta se datorește ușurinței cu care pot fi prelucrate materialele, fie în scopul tăierii sau practicării de găuri de diferite forme, fie în scopul rectificării suprafețelor.

Procedeul de prelucrare cu ajutorul ultrasunetelor este în unele privințe superior procedeelor obișnuite. Astfel, posibilitățile procedei de prelucrare mecanică prin așchiere, sînt limitate de duritatea materialului care se prelucurează, ca și de fragilitatea acestuia. De asemenea procedeele noi de electrocoroziune și de prelucrare electrochimică oferă un domeniu limitat de aplicație, neputîndu-se folosi decît în cazul materialelor conductoare de curent electric, în timp ce la procedeul ultrasonic nu există această limitare.

Perforarea și tăierea cu ultrasunete. Operația se efectuează cu ajutorul unei scule care are o mișcare vibratorie cu frecvență mare și amplitudine

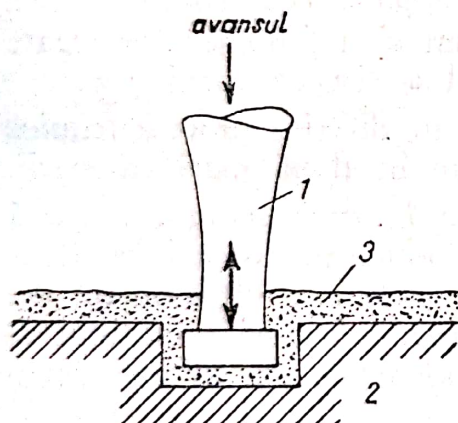


Fig. 5.1. Principiul perforatorului ultrasonic:

1 — perforatorul; 2 — piesa de prelucrat; 3 — material abraziv.

mică, în timp ce în zona de prelucrare se introduce o pastă de praf abraziv în suspensie în ulei sau în apă (fig. 5.1). Deci elementul care acționează direct asupra suprafeței piesei care se prelucurează nu este scula, ci grăuntele de abraziv, care pentru acțiunea de bombardare a suprafeței piesei primește energia de la scula care vibrează. Sub acțiunea ultrasunetelor, grăuntele de abraziv ciocnește suprafața materialului cu o forță care depășește de câteva mii de ori greutatea lui proprie. Astfel, în cazul unui abraziv avînd o masă specifică de 3 gr/cm^3 , iar diametrul mediu al granulei fiind de $0,02 \text{ mm}$, forța cu care este proiectată poate ajunge la 1 gram-forță dacă frecvența ultrasunetului este de 20 kHz și amplitudinea vibrațiilor de $0,04 \text{ mm}$. Aceasta se datorește valorilor ridicate ale accelerațiilor ce intervin în mișcarea vibratorie.

În urma acțiunii de eroziune din partea particulelor de abraziv, se pot observa două feluri de sfărîmări ale materialelor ce se prelucurează;

măcinarea materialului aflat direct sub particulele de abraziv, deci de pe fața perpendiculară la direcția în care se produce mișcarea vibratorie și formarea unor fisuri, care duc apoi la ruperea unor particule mai mari de material.

Pentru producerea vibrațiilor ultrasonice, la instalațiile de prelucrarea materialelor se folosesc în general emițătoare magnetostrictive, lucrând în domeniul frecvențelor ultrasonice joase, în banda cuprinsă obișnuit între 18 și 25 kHz. Utilizarea unor asemenea emițătoare este condiționată de robustețea acestora și de eficacitatea mare pe care o au în banda de frecvență susmenționată.

Cum chiar prin folosirea unor transductoare magnetostrictive nu pot fi obținute amplitudini ale vibrațiilor mai mari de $5-10\mu$, ceea ce reprezintă o valoare insuficientă pentru operațiile de perforare sau de tăiere, s-a impus amplificarea acestor vibrații. În acest scop, între sculă și fața vibrantă a transductorului magnetostrictiv, se interpune un transformator acustic, constituit dintr-o bară de secțiune variabilă, secțiunea mare fiind în dreptul transductorului, iar secțiunea mică în dreptul sculei. Un astfel de transformator acustic a fost studiat la cap. 2. Mărimea factorului de amplificare este limitată de rezistența materialului din care este făcut transformatorul acustic. De regulă acesta se confecționează din oțel 65 G, iar pentru mașini mai puternice din oțel 45 sau oțel 50.

Datorită faptului că scula nu are o mișcare de rotație, ci o mișcare de translație alternativă, perforarea cu ultrasunete nu este limitată numai la găuri circulare, ci pot fi practicate orificii având secțiuni de orice formă. Practicarea unor asemenea găuri se face prin alegerea profilului adecvat al sculei (fig. 5.2). Ținând seama că piesa care se uzează cel mai mult în timpul prelucrării este scula, aceasta constituie o piesă separată de concentrator, putându-se lipi sau înșuruba, la capătul acestuia. Atunci când se lipește se folosește un aliaj dur.

Un factor important în eficiența dispozitivului îl constituie calitatea lipiturii dintre sculă și concentrator, aliajul de lipit trebuie să fie întins uniform pe toată suprafața de contact, nefiind admise locuri nelipite sau goluri oricât de mici.

Piesa care se prelucrează se fixează pe masa mașinii, folosindu-se în acest scop un sistem de strângere. Atunci când gaura trebuie să pătrundă pînă în partea opusă piesei, aceasta se montează pe un suport.

Ca în orice proces tehnologic de producție, și în acest caz interesează viteza de prelucrare și precizia cu care se face această prelucrare, cele

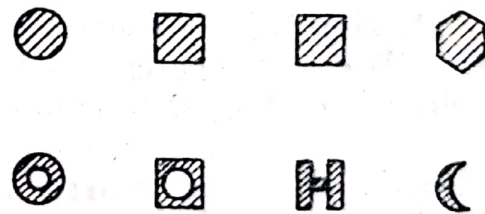


Fig. 5.2. Profile ale sculei perforatorului ultrasonic.

două elemente susmenționate caracterizînd eficacitatea metodei. În urma cercetărilor efectuate s-a constatat că viteza de prelucrare depinde de: amplitudinea și frecvența vibrațiilor, forma sculei și presiunea exercitată de aceasta asupra piesei, duritatea și dimensiunile granulelor de abraziv, viscozitatea lichidului în care se găsesc în suspensie particole de abraziv, mărimea suprafeței de prelucrat și adîncimea care trebuie practică, precum și natura materialului care trebuie perforat. Viteza de prelucrare nu depinde de profilul găurii.

Vom examina pe scurt modul în care fiecare din acești parametri influențează viteza de prelucrare.

a) Viteza de prelucrare a piesei crește odată cu mărirea amplitudinii vibrațiilor sculei fiind aproximativ proporțională cu mărimea amplitudinii de vibrație. Dar nu se pot depăși anumite limite, chiar atunci cînd pentru confecționarea concentratorului se întrebuintează oțeluri de scule. Dacă amplitudinea vibrațiilor depășește 0,12 mm, se constată fisurarea și chiar ruperea barei. Pentru a satisface în același timp și cerințele impuse de existența unei viteze de prelucrare cît mai mari și cerințele impuse de asigurarea rezistenței barei se recomandă următoarele amplitudini ale vibrațiilor:

— la prelucrarea brută	40—50 μ
— la finisare	20—40 μ

Această necesitate a dus la folosirea de ultrasunete de frecvențe relativ joase, în general cuprinse între 18—25 kHz, bandă în care pot fi realizate amplitudini destul de mari ale vibrațiilor. Prin alegerea acestei game de frecvențe se obține în afara unei eficacități sporite, funcționare fără zgomot și o construcție compactă a capului.

b) Viteza de prelucrare atinge o valoare maximă la o anumită presiune de contact, pe care trebuie să o exercite scula asupra piesei care se prelucrează. Această presiune nu trebuie să fie prea mare, deoarece în acest caz poate provoca o amortizare a vibrațiilor. Presiunea depinde în special de natura materialului care se prelucrează și în cazul unui material dat, ea depinde de mărimea suprafeței găurii, trebuind a fi cu atît mai redusă cu cît secțiunea este mai mare. De exemplu, în cazul sticlei, pentru practicarea unei găuri, avînd diametrul de 1 mm, presiunea optimă este de 0,3 kgf/mm², iar dacă diametrul găurii crește la 6 mm presiunea trebuie să scadă la 0,02 kgf/mm². În plus, valoarea presiunii optime devine mai mare pe măsură ce amplitudinea vibrațiilor crește.

La multe instalații presiunea de contact necesară este asigurată de greutatea proprie a capului. La alte instalații apăsarea necesară se reali-

zează cu ajutorul unor dispozitive speciale pneumatice, hidraulice, sau cu arc. În ultimul timp se observă tendința de folosire în acest scop a motoarelor mici, comandate separat, care asigură comoditatea operațiilor de comandă. Oricare ar fi dispozitivul sau sistemul folosit, presiunea de contact trebuie să rămână aceeași pe timpul prelucrării, cu alte cuvinte pe tot timpul avansului sculei.

c) Substanța abrazivă ce se întrebuințează depinde de natura materialului care trebuie prelucrat. Atunci când se prelucrează piese din sticlă, ceramică, porțelan, din aluminiu sau din germaniu, se întrebuințează ca substanță abrazivă carbura de siliciu și corindon. Pentru prelucrarea oțelurilor de scule, a oțelurilor magnetice sau a altor metale cu durități asemănătoare se folosește praf de carbură de bor. Această substanță are și avantajul că se umectează bine în apă și are o greutate specifică mică, ceea ce face să se mențină satisfăcător în suspensie. Pentru prelucrarea materialelor foarte dure (carbura de wolfram, carbura de tungsten) se folosește ca substanță abrazivă praful de diamant.

Viteza de prelucrare scade cu micșorarea dimensiunilor granulelor de abraziv, dacă acestea sînt mici în raport cu amplitudinea vibrațiilor. Ținînd, însă, seama că prin mărirea dimensiunilor particulelor abrazive se înrăutățește netezimea suprafeței care se prelucrează, trebuie găsită o soluție de compromis în alegerea fineței prafului abraziv. În general, pentru prelucrarea brută se pot folosi substanțe abrazive avînd o granulație ceva mai mare ($5-10 \mu$), iar la prelucrarea fină o granulație de ordinul a 1μ .

Construcția sculei trebuie să asigure pătrunderea suspensiei de abraziv în zona de prelucrare. În acest scop se prevăd în sculă cavități și canale. Se recomandă ca la prelucrarea găurilor înfundate, scula să fie ridicată din timp în timp, în vederea umplerii cavității cu abraziv proaspăt și a evacuării particulelor de material rezultate din prelucrare. Pentru ca abrazivul să nu se depună pe masă, se prevăd canale de scurgere cu pantă mare, ca și găuri pătrunse date în suprafața mesei.

Transportarea substanței abrazive în zona de prelucrare este asigurată cu ajutorul unei vene de lichid. Aceasta servește totodată și la răcirea zonei de prelucrare și la evacuarea particulelor detașate din material. Raportul abraziv-lichid nu este critic, însă din practică se obișnuiește a se utiliza rapoarte cuprinse între 1:2 la 1:3 în greutate. În instalațiile de perforare cel mai utilizat lichid este apa, deoarece are o capacitate de umectare satisfăcătoare, are o viscozitate mică, fapt care face să crească viteza de prelucrare și în plus asigură o bună răcire a zonei de lucru. Pentru găurirea cu ultrasunete, debitul lichidului cu abraziv în suspensie

este indicat a fi egal cu 2...3 l/mm. Este important ca abrazivul să fie menținut în permanență bine amestecat cu apa.

d) Cu cât suprafața de prelucrare a piesei este mai mare cu atât viteza de prelucrare este mai redusă. Au fost realizate mașini cu puterea de 0,05...2,4 kW, permițând practicarea de găuri cu diametrul de 60 mm. Dimensiunea maximă a găurii este determinată de puterea mașinii, iar cea minimă de rigiditatea sculei și de sensibilitatea mecanismului de avans.

În raport cu natura materialului, suprafața maximă care se poate prelucra cu ajutorul ultrasunetelor este:

Sticlă	20 cm ²	Ceramici	15 cm ²
Germaniu și siliciu	20 cm ²	Metale dure	7,7 cm ²
Ferite	20 cm ²	Oțel de scule călit	7,7 cm ²

Cu o putere electrică de 40 W, care permite să se obțină o amplitudine a vibrațiilor de ordinul 50 μ pe o suprafață de 1 cm², se poate practica o gaură pătrată cu latura de 6 mm și adâncime de 3 mm în aproximativ un minut în sticlă, în ceramică și în numeroase materiale similare. În carbura de tungsten practicarea unei găuri similare durează circa 10 minute.

După A. I. Markov, vitezele de prelucrare cu ajutorul ultrasunetelor, precum și uzura relativă a sculei, în cazul diferitelor materiale sînt indicate în tabela 5.1.

Tabela 5.1

Materialul de prelucrat	Viteza de prelucrare mm/min	Uzura relativă %
Sticlă, cuarț	5 — 15	0,5 — 1
Metale dure	0,05 — 0,3	40 — 150
Aliaj refractar deformabil	0,03 — 0,08	150 — 200
Aliaj refractar turnat	0,06 — 0,10	130 — 180
Oțel călit	0,05 — 0,10	120 — 200

Precizia prelucrării materialelor cu ajutorul ultrasunetelor depinde în primul rînd de granulația materialului abraziv. Cu cât granulele sînt mai mari, cu atât abaterile dimensiunilor găurii practicate sînt mai mari, rezultînd deci o precizie mai redusă. Mărimea granulelor mai influențează și calitatea suprafeței care se obține în urma prelucrării și anume, pe măsură ce granulele substanței abrazive sînt mai mari, înălțimea microneregularităților crește, atît în cazul prelucrării materialelor dure, cît și la prelucrarea materialelor casante. Raportul înălțimilor

microneregularităților poate varia de la 1...10. Invers, folosirea unui abraziv cu o granulație foarte fină în suspensie în ulei în loc de apă, permite realizarea unor clase de netezime relativ mari.

Precizia prelucrării cu ajutorul ultrasunetelor mai depinde de amplitudinea vibrațiilor, de presiunea de contact dintre sculă și suprafața piesei, de uzura transversală a sculei și de centrul acesteia. Dacă scula nu este prea lungă și este bine centrată, vibrațiile transversale ale acesteia sînt neînsemnate față de cele longitudinale, care după cum se știe produc găurirea piesei. În consecință, în această situație vibrațiile transversale nu au vreo influență privind creșterea dimensiunilor găurilor executate, deci nu influențează în rău precizia operației de prelucrare.

În urma studiilor experimentale efectuate, s-a stabilit că la prelucrarea pieselor ceramice precizia maximă este de 0,05 mm, iar la prelucrarea metalelor dure de la 0,01...0,02 mm pînă la 0,05...0,07 mm, în funcție de granulozitatea abrazivului întrebuintat. Prelucrarea brîului de calibrare și a conului director la filierele din aliaje dure, prin folosirea ultrasunetelor asigură obținerea unei precizii $\pm 0,01...0,03$ mm, la o productivitate medie de 250...300 mm³/h.

Cu toate că pentru confecționarea sculei sînt utilizate materiale tenace, în general oțel carbon obișnuit, oțel 45 sau oțel 50 și chiar oțel inoxidabil, totuși scula suferă pe timpul prelucrării o uzură mai mult sau mai puțin accentuată, care poate ajunge în cazul metalelor dure pînă la 150...200%. Pentru a preveni o asemenea uzură a sculei, s-a găsit necesar să se suprapună două operații care trebuie efectuate simultan: prelucrarea cu ultrasunete și dizolvarea anodică. Prin această ultimă operație, pe suprafața metalului se formează o peliculă fragilă de oxid. În acest caz, granulele de abraziv nu mai acționează direct asupra metalului de prelucrat, care este tenace, ci în primul rînd asupra peliculei fragile de oxid. După înlăturarea acestei pelicule de către granulele de abraziv acționate de ultrasunete, curentul electric care străbate electrolitul formează o nouă peliculă de oxid, care este înlăturată cu ajutorul ultrasunetelor, operația de perforare continuîndu-se în acest mod.

Prin folosirea acestui procedeu de prelucrare combinată, productivitatea crește de 3 ori în cazul prelucrării oțelului călit și de 2,5—4 ori în cazul prelucrării aliajelor și a metalelor dure, în timp ce uzura sculei se micșorează de 2—4 ori. În schimb durata prelucrării s-a mărit într-o oarecare măsură.

O instalație de prelucrarea materialelor cu ajutorul ultrasunetelor cuprinde două părți esențiale: mașina de prelucrat și generatorul de oscilații de înaltă frecvență (fig. 5.3). Dacă în loc de perforator se montează

o lamă subțire, dispozitivul poate servi și la tăierea pieselor. Metoda ultrasonică arătată mai sus poate fi aplicată cu bune rezultate și la gravări, în suprafețe dure sau casante. Bineînțeles asemenea lucrări cer o tehnică mai specială, care însă nu prezintă mari dificultăți în aplicare.

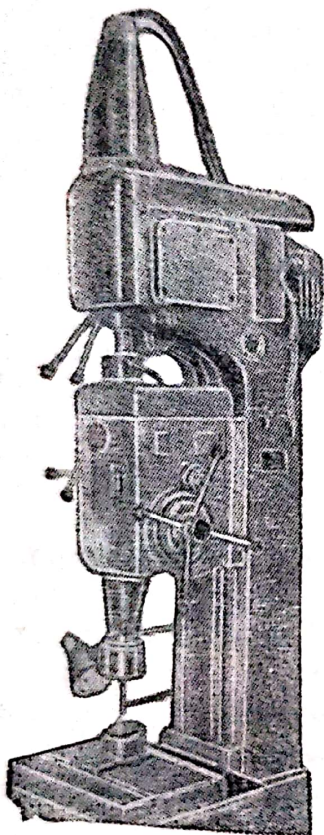


Fig. 5.3. Instalație de prelucrarea pieselor metalice cu ultrasunete.

Prelucrarea cu ajutorul ultrasunetelor capătă astăzi o extindere tot mai mare, datorită avantajelor pe care le prezintă. Pot fi prelucrate cu destul de mare ușurință materialele dure și foarte dure, precum și materialele casante, în acest ultim caz înlăturându-se aproape total rebuturile care se produceau la folosirea metodelor de prelucrare obișnuite. La prelucrarea pieselor din sticlă, economia de material ajunge adesea la 20—50%. Un alt avantaj al metodei constă în aceea că pot fi practicate găuri de orice formă, obținându-se o precizie și o acuratețe mare în prelucrare.

Procedeul de prelucrare cu ajutorul ultrasunetelor își găsește un domeniu mai larg de utilizare decât procesele obișnuite prin faptul că nu există o limitare a utilizării datorită durității materialului sau a fragilității acestuia și nici o limitare impusă de conductibilitatea electrică a materialelor, ca în cazul procedeelor bazate pe electrocoroziune.

Metoda ultrasonică de prelucrare prezintă totuși un dezavantaj prin faptul că nu pot fi prelucrate materiale ușor deformabile, deoarece în asemenea cazuri particulele de abraziv pătrund în materialul piesei și în felul acesta eroziunea încetează a se mai produce.

Metoda de prelucrare cu ultrasunete poate fi combinată cu alte metode de prelucrare conducând la rezultate foarte bune. Astfel la prelucrarea pieselor din materiale bune conductoare de electricitate, metoda ultrasonică poate fi combinată cu metoda electroerozivă. Pentru prelucrarea brută, unde se cere detașarea din piesă a unor cantități mai mari de material, este indicat a se folosi metoda electroerozivă. Ulterior, pentru prelucrarea fină, unde se cere o precizie și o acuratețe mai mare, este indicat a se folosi metoda ultrasonică.

Principiul combinării metodei ultrasonice cu alte metode, în speță metoda de prelucrare cu scînteii electrice, a condus la crearea unor mașini universale de broșat. La puterea de 1,5 kW se pot îndepărta 1 200—1 500 mm³ sticlă/minut, iar la puterea de 1 kW, 800 mm³ sticlă pe minut și 20 mm³ de metal dur într-un același interval de timp.

Rectificarea suprafețelor. Acțiunea erozivă, pe care o au granulele de abraziv proiectate cu ajutorul ultrasunetului asupra corpului ce se prelucurează, a fost utilizată și pentru rectificarea suprafețelor metalice, construindu-se mașini de rectificat cu ultrasunete. În acest caz se folosește un emițător puternic de ultrasunete așezat la o distanță de cîteva sutimi de milimetru de suprafața de lucru a discului de rectificat. Lichidul de răcire este trimis prin acest emițător în interspațiul dintre el și discul de rectificat. Se obține astfel o rectificare mai bună decît în cazul procedeelor obișnuite, concretizate prin micșorarea înălțimii microasperităților (la peste două ori), reducerea tensiunilor remanente și micșorarea simțitoare a apăsării și temperaturii pe timpul rectificării, ceea ce conduce la înlăturarea arsurilor și microfisurilor.

Faptul că prin utilizarea ultrasunetelor la rectificarea plană a aliajelor refractare și a oțelurilor de scule se îmbunătățește simțitor calitatea suprafeței, a făcut să se cerceteze influența vibrațiilor de înaltă frecvență asupra proprietăților așchietoare ale sculelor pe timpul ascuțirii lor. În urma experiențelor efectuate recent, s-a constatat că provocarea unor vibrații ultrasonice întreținute, avînd amplitudini mici, are o influență favorabilă asupra calității suprafeței ascuțite, atît în cazul sculelor din oțel rapid, cît și a celor din metal pur. În cazul ascuțirii sculelor cu răcire se poate conta pe un efect și mai mare. S-a observat că durabilitatea cuțitelor ascuțite cu vibrații ultrasonice depășește cu de peste două ori durabilitatea cuțitelor ascuțite fără vibrație. În plus, vibrațiile de frecvență ridicată îmbunătățesc condițiile de acces ale lichidului de ungere și de răcire în zona de scurgere, asigurînd în acest mod ușurarea condițiilor de ascuțire a sculelor.

5.2.2. Curățirea cu ajutorul ultrasunetelor. *Curățirea pieselor metalice.* În decursul procesului de fabricare a pieselor și ansamblurilor, pe acestea se depun impurități ca: praf, ulei, unsoare, span etc. care trebuie înlăturate. Aceasta implică efectuarea unei operații de curățire.

În prezent, sînt aplicate în industrie o serie de metode care permit efectuarea unui asemenea proces.

Curățirea pieselor metalice cu ajutorul ultrasunetelor împreună cu curățirea electrolică constituie metodele cele mai moderne și care dau de altfel cele mai bune rezultate. Metoda ultrasonică oferă chiar un domeniu mai larg de aplicare decât metoda de curățire electrolică prin faptul că utilizarea ei nu este limitată numai la metalele feroase și în special la piesele confecționate din oțel moale.

În trecut, datorită costului ridicat al instalațiilor și în special al emițătoarelor ultrasonice, metoda de curățire nu era folosită decât pentru curățirea pieselor fine și scumpe, cum ar fi angrenajele de ceasornic. În prezent în urma progresului realizat în construcția emițătoarelor de ultrasunete, metoda se aplică și la piesele de mare serie (șuruburi, ace, rulmenți, rotoare și statoare ale motoarelor electrice, întrerupătoare electrice). Curățirea cu ultrasunete s-a extins de asemenea și la piese mari, capacitatea mașinilor moderne putând ajunge la 50 tone.

Acțiunea ultrasunetelor pentru curățirea suprafețelor solide se bazează pe unele efecte pe care le produc acestea atunci când se propagă în lichidul în care sînt imersate piesele. Studiile recente atribuie cavitației efectul de curățire și nu forțelor acceleratoare mari pe care le produc vibrațiile ultrasonice. Aceasta este dovedită de faptul că procesul de curățire încetează complet când se impun anumite condiții care fac să nu se producă cavitația (de exemplu, creșterea presiunii hidrostatice). Datorită fenomenului cavitației este distrusă și îndepărtată de pe suprafața piesei pelicula de unsoare sau stratul de murdărie.

Cu ajutorul imaginilor obișnuite prin cinematografiere rapidă a putut să fie urmărit îndeaproape procesul de curățire ultrasonică. Acest proces

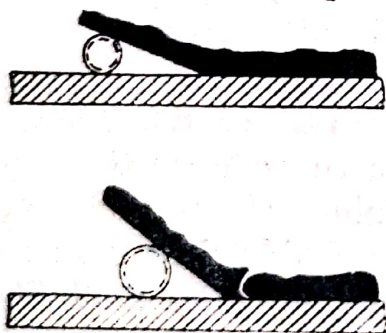


Fig. 5.4. Principiul curățirii pieselor cu ajutorul ultrasunetelor.

are loc în două etape. Într-o primă etapă se produc bulele de cavitație, care este urmată imediat de fisurarea sau de ruperea unei bucăți din stratul de murdărie existent pe suprafața materialului. Este interesant de menționat că bulele de cavitație care vibrează în apropierea stratului nu produc nici o acțiune distructivă atunci când suprafața este netedă. În cea de a doua etapă, un alt mecanism distructiv poate fi observat. Bule mici pătrund în porii stratului de murdărie sau între golurile ivite între stratul de murdărie desprins în parte și suprafața piesei

(fig. 5.4). Bulele continuă să vibreze și forțele care iau naștere în urma acestor vibrații acționează asupra peliculei, făcînd să se desprindă tot mai mult de pe suprafața piesei. Ori de cîte ori aceste forțe devin mai mari decât forțele de adeziune dintre peliculă și suprafața piesei sau

decît rezistența peliculei se produce acea desprindere de care am vorbit și totodată se produce și ruperea peliculei. În această a doua etapă, influența cavității propriu zise nu mai are importanță. Se știe că ultrasunetul are și o acțiune de dispersare. Granulele aflate la suprafața de separație dintre lichid și solid sînt dispersate cu ușurință, deoarece pe o astfel de suprafață apar frecvent germeni de cavitație. Deci procesul de cavitație este datorit pe lîngă eroziunii produsă de cavitație și dispersiei impurităților insolubile în lichid. Ultrasunetele propagîndu-se în toată masa lichidului, punînd în vibrație toate particulele fluidului, rezultă că este posibilă și curățirea suprafețelor celor mai ascunse sau greu accesibile, dar care sînt umectate de lichid. Cercetările experimentale au arătat că pot fi îndepărtate impurități din orificii avînd diametre de numai 0,8 mm. În felul acesta pot fi curățite interioarele conductelor pentru injectarea combustibilului la motoarele Diesel, canalele de ulei, acele de seringă, precum și piesele montate. În aceasta constă și unul din avantajele pe care le prezintă aplicarea metodei curățirii ultrasonice față de alte metode care se bazează pe trecerea unui lichid prin orificiul îngust. Cunoscînd că rezistența de scurgere printr-un canal este invers proporțională cu puterea a patra a razei canalului, rezultă că în cazul unor asemenea orificii, viteza de scurgere a lichidului este practic nulă, astfel încît aceste metode nu pot fi folosite. În plus, datorită faptului că un dispozitiv pentru a fi curățat nu mai trebuie demontat în piese componente și apoi reasamblat și reglat, reprezintă un apreciabil cîștig de timp.

Instalațiile moderne de curățire cu ultrasunete cuprind obișnuit patru camere: camera de precurățire fără ultrasunete, baia de tratare cu ultrasunete, camera de spălare ulterioară și camera de uscare. Dacă piesele supuse curățirii nu sînt prea murdare și dacă pentru precurățire și tratare cu ultrasunete este folosit același solvent, la aceeași temperatură, primele două camere pot fi contopite într-una singură. Recipientul unde se face ultrasonarea este prevăzut la partea sa inferioară cu un colector de impurități, unde se depun reziduurile mai grele, detașate de pe suprafața pieselor curățate. Impuritățile pot fi evacuate prin intermediul unor țevi cu robinet. Trebuie acordată atenție dimensionării recipientului în interiorul căruia se face ultrasonarea și alegerii materialului din care urmează a fi confecționat. Necesitatea obținerii unui cîmp acustic difuz și cît mai omogen implică existența unor recipiente ale căror dimensiuni să depășească de cîteva ori lungimea de undă a ultrasunetului folosit. Avînd însă în vedere procesul de atenuare a undelor acustice cu distanța, se consideră că în cazul introducerii în vasul de curățire a unui lichid puțin vîscos și a folosirii unei intensități acustice de 2—3 W/cm² dimensiunea

maximă a băii nu trebuie să fie mai mare de 20λ . În ceea ce privește materialul din care se construiesc pereții recipientului, acesta trebuie să reziste la acțiunea de coroziune puternică, datorită fenomenului de cavitatie acustică. De aceea recipientul se confecționează obișnuit din tablă de oțel inoxidabil, iar atunci când se lucrează cu soluții care atacă metalul, suprafețele interioare ale băii se căptușesc cu o foaie din viniplast. Instalația mai cuprinde generatorul de ultrasunete și un dispozitiv pentru filtrarea lichidului de impuritățile conținute în urma procesului de curățire. După filtrare, lichidul este refulat cu ajutorul unei pompe, din nou în baia de tratare cu ultrasunete.

Ca emițătoare de ultrasunete sînt folosite în prezent atît emițătoarele magnetostrictive, cît și cele piezoelectrice cu cuarț și cu titanat de bariu. Emițătoarele magnetostrictive cu tole din nichel sînt întrebuintate atunci cînd este nevoie a se lucra cu vibrații ultrasonice de frecvență joasă, cuprinse între 20—40 kHz și cu puteri mari. Dacă lichidul folosit ca solvent, prin natura sa și prin temperatura la care este încălzit, nu atacă plăcile de titanat de bariu, pot fi folosite în această gamă de frecvențe și emițătoare cu titanat de bariu. În acest caz este indicat ca transductorul să fie și un focalizator de energie ultrasonică al cărei focar este bine a fi plasat la cca. 3 cm de suprafața plăcii concave. Comparativ însă oscilatoarele cu nichel sînt mai avantajoase, deoarece datorită puterii mai mari pe care o au, ele fac să se reducă timpul de ultrasonare necesar curățirii. Emițătoarele cu cuarț sînt folosite în domeniul frecvențelor mai ridicate.

Deoarece cheltuielile de investiții într-o astfel de instalație sînt încă mari, se caută ca aceste cheltuieli să fie amortizate cît mai curînd cu putință. În acest scop, tendința este de a se reduce cît mai mult duratele de expunere la acțiunea ultrasunetelor. De aceea în cazul pieselor puternic impurificate este indicat a se introduce o curățire, prealabilă, fără ultrasunete, care să înlătore grosul murdăriei și numai după aceea piesele se introduc în instalația de curățire cu ultrasunete.

Cercetările experimentale au căutat să determine modul în care diferiți parametri fizici influențează procesul de curățire. Au fost luați în studiu durata iradierii ultrasonice, frecvența și intensitatea ultrasunetului, natura și temperatura solventului.

a) În cazul metalelor, cantitatea de impurități eliminată crește direct proporțional cu durata iradierii, cu excepția unei perioade inițiale egală cu circa 5 secunde, în care curățirea este mai puțin accentuată. În cazul ceramicelor nu există o asemenea perioadă, cantitatea de impurități înlăturate crește proporțional cu durata iradierii, chiar de la începutul acțiunii. În general, la curățirea pieselor metalice, din practică, s-a văzut

că o durată de iradiere de ordinul a 20—30 s este suficientă. O durată de 1 minut poate fi considerată ca un maxim.

b) Stadiul actual al cercetărilor nu permite să se formuleze reguli precise cu privire la frecvența ultrasunetului, care trebuie folosită. După unii autori, frecvențele care convin cel mai bine procesului de curățire sînt cele cuprinse între 300 și 500 kHz. Alți autori preconizează folosirea unor frecvențe mai coborîte cuprinse între 20—40 kHz. Realitatea este că în raport cu forma și dimensiunile pieselor care se curăță și cu natura murdăriei ce trebuie îndepărtată (praf, reziduri de la rectificare, resturi de lacuri, săruri de călire, unsoare etc.) se impune o anumită frecvență a ultrasunetelor. Notînd cu k numărul undei și cu a dimensiunea caracteristică a piesei, rezultă că atîta timp cît $ka \ll 1$ piesa este radiată uniform. Dacă însă $ka \gg 1$, se formează în spatele piesei, privind-o din direcția emițătorului, zone de umbră și iradierea va fi incompletă, dacă piesa nu se rotește sau se mișcă. Pentru ca o piesă de dimensiuni mari să fie bine curățată, deci pentru a nu fi creată o „umbră acustică”, este necesar să fie folosite ultrasunete de frecvențe coborîte. Asemenea frecvențe sînt indicate și la curățirea pieselor de resturi de lacuri, de straturi de ulei întărite și rezistente, adică în toate cazurile în care procesul de cavitație trebuie să fie cît mai puternic pentru a înlătura stratul de murdărie. În recipientul cu apă, la o frecvență de 40 kHz se obține o iradiere bună a pieselor, ale căror dimensiuni caracteristice nu depășesc 2 cm. Astfel, dacă trebuie curățate piese de dimensiuni mari pentru a nu fi creată o „umbră acustică” în spatele pieselor, unde nu s-au produs vibrații acustice, este necesar a fi folosite ultrasunete avînd frecvențe coborîte. Nu se recomandă însă să se coboare frecvența ultrasunetelor sub 40 kHz, deoarece prima sa subarmonică nu se situează deasupra limitei superioare a frecvențelor audibile și zgomotul produs pe timpul operației poate fi dăunător omului. Dacă însă piesele au orificii mici sau sînt de forme complicate, este indicată folosirea de ultrasunete avînd frecvențe mai ridicate. Instalațiile moderne folosesc în general frecvențe cuprinse între 40 și 90 kHz. În nici un caz nu se recomandă a se utiliza frecvențe mai mari de 500 kHz, care pe lîngă că creiază acea „umbră acustică”, nu provoacă o cavitație acustică destul de activă și concomitent mai suferă și o absorbție puternică în lichidul în care sînt imersate piesele, deci intensitatea acustică se micșorează. În general, folosirea ultrasunetelor în gama frecvențelor joase, este indicată și prin aceea că procesul de curățire poate fi efectuat cu intensități mai mici ale ultrasunetelor.

c) Cu cît intensitatea ultrasunetului în baia de curățire este mai mare, cu atît procesul de curățire se efectuează în condițiuni mai bune. În ge-

neral, este necesar ca intensitatea acustică să aibă o astfel de valoare care să permită producerea cavitației. Ținând seama de frecvențele ultrasunetelor utilizate în mod curent, se poate considera suficientă o intensitate de ordinul a 5—8 W/cm², putându-se obține cu generatoare avînd puteri de 0,8—1 kW. Cu cît frecvența ultrasunetului este mai coborîtă, cu atît intensitatea necesară este mai redusă. După Neppiras intensitatea optimă în gama de frecvențe 20—50 kHz este: 2—3 W/cm² în apă și 1,5—2 W/cm² în majoritatea solvenților organici. După P. Wenk, o intensitate de 7 W/cm² este suficientă pentru efectuarea curățirii într-un volum de lichid de cca. 4 litri. Pentru curățirea unor piese de dimensiuni mai mari, recipientul cu lichid trebuie să aibă o capacitate mai mare și în acest caz trebuie utilizate două sau mai multe emițătoare care lucrează simultan, amplasate pe fundul și pereții recipientului. Există instalații cu puteri cuprinse între 100 W și 4 kW și cu capacități ale recipientului variînd între 0,2 și 100 l.

d) În ceea ce privește soluția de decapare, aceasta trebuie astfel aleasă încît să aibă proprietățile chimice necesare pentru a concura la îndepărtarea impurităților. În acest scop pot fi folosite: triclorura de etilen, perclorura de etilen, leșii de spălare în concentrație mai slabă, benzină etc.; dar cu bune rezultate se poate întrebuița apa.

Temperatura băii de curățire joacă în general un rol important și anume în ambele direcții. Sînt cazuri cînd curățirea se efectuează în cele mai bune condițiuni, atunci cînd lichidul din baie este în fierbere. În asemenea cazuri trebuie întrebuițate transductoare cu cristal de cuarț sau titanat de bariu, care rezistă la temperaturi mai înalte decît alte materiale piezoelectrice. Există însă și unele cazuri cînd în urma unei temperaturi prea ridicate este atacată suprafața piesei care se curăță sau se produce o întărire a stratului de murdărie depus pe această suprafață. Atunci cînd trebuie curățate piese vopsite cu lac, la care nu trebuie ca părțile vopsite să fie atacate sau desprinse prin acțiunea ultrasunetelor, este necesar ca temperatura lichidului să fie și mai coborîtă. Ori de cîte ori însă, natura piesei care se curăță și natura solventului o permit, este indicat pentru obținerea unei eficacități cît mai mari a procesului de curățire cu ultrasunete ca lichidul să se găsească la o temperatură ceva mai ridicată decît temperatura încăperii, ea depinzînd de natura solventului întrebuițat. În urma cercetărilor întreprinse de L. D. Rosenberg au rezultat curbele indicate în fig. 3.14 care dau eficacitatea curățirii, exprimată prin cantitatea de impurități înlăturate de pe suprafața piesei, în funcție de temperatura solventului. Curbele au fost trasate pentru trei solvenți, apă, petrol lampant și alcool. Din examinarea diagramei se

constată că temperatura optimă în cazul apei este 55°C, în timp ce în cazul petrolului lampant temperatura optimă este în jur de 26°C.

Cînd este necesar ca baia să fie încălzită, ea este prevăzută cu elemente de încălzire care permit obținerea temperaturii voite. Menținerea ei constantă se realizează cu ajutorul unui termostat. Trebuie menționat că lichidul servește în același timp și ca mediu de propagare a undelor ultrasonice, asigurînd o bună transmisie a energiei acustice de la emițător la piesele care sînt supuse acțiunii ultrasunetelor.

Pentru a se constata avantajele metodei de curățire cu ultrasunete, au fost măsurate resturile de murdărie rămase după folosirea a trei metode mai moderne și anume: curățirea cu ultrasunete, degresarea cu aburi și spălarea cu jet sub presiune. În acest scop a fost efectuată în prealabil o impurificare a suprafeței piesei cu un ulei avînd vîscozitatea mare și care a fost făcut radioactiv pe cale artificială. Gradul de curățire a fost constatat prin măsurarea radioactivității peliculei de ulei înainte și după operația de curățire. Astfel a putut fi stabilit cu precizie, în miligrame, restul de impurități rămase în porii suprafeței piesei. În fig. 5.5 este redat rezultatul cercetării din care rezultă superioritatea netă a metodei de curățire prin folosirea ultrasunetelor. Metoda ultrasonică permite și înlăturarea calaminei, care nu poate fi înlăturată prin alte metode moderne de curățire. Calamina este un reziduu negru, divizat fin, combinat cu particule microscopice din metalul de bază, care subsistă pe suprafața metalică, chiar după ce a fost înlăturat uleiul și unsoarea sau alte murdării.

Una din cele mai recente și interesante aplicații de curățire prin ultrasunete este decontaminarea pieselor infectate prin radioactivitate. Se pare că rezultatele obținute sînt din ce în ce mai bune, însă și aici se pune problema înlăturării din mașină și din baie a substanțelor radioactive rămase de pe urma curățirii.

În ultimul timp procesul de curățire cu ultrasunete a fost automatizat, creindu-se instalații la care transportul produsului de curățat prin diferitele compartimente ale instalației se face fără nici o muncă manuală. Au fost realizate instalații automate atît pentru curățirea pieselor care se pot atinge și freca unele de altele, cît și pentru curățirea de piese care nu trebuie să se atingă între ele, cum ar fi piesele deja lustruite, în care caz ele trebuie prinse în dispozitive speciale.

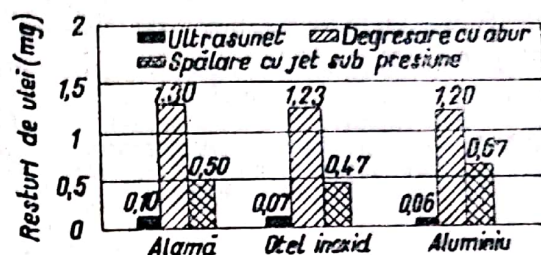


Fig. 5.5. Rezultate comparative ale curățirii pieselor metalice prin folosirea a trei metode.

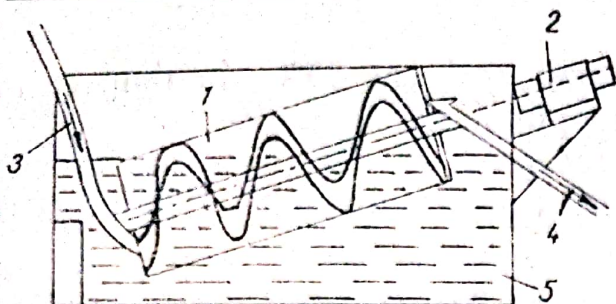


Fig. 5.6. Dispozitiv automat de curățire cu melc:

1 — melc rotativ; 2 — motor pentru acționarea melcului; 3 — plan înclinat pentru alimentare; 4 — plan înclinat pentru evacuarea pieselor; 5 — baie.

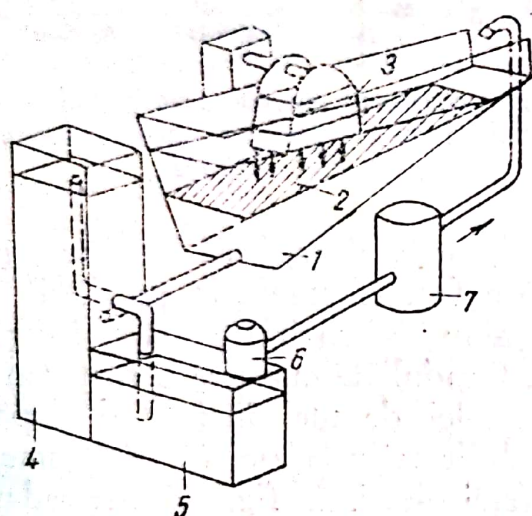


Fig. 5.7. Dispozitiv automat de curățire cu jgheab:

1 — jgheab vibrator; 2 — sită; 3 — emițător ultrasonic; 4, 5 — vase pentru depozitarea lichidului; 6 — pompă; 7 — filtru.

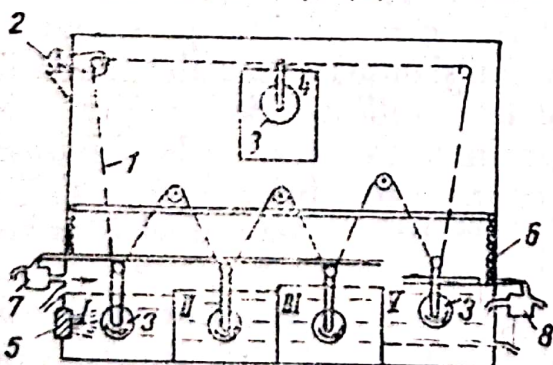


Fig. 5.8. Dispozitiv automat de curățire cu lanț transportor:

1 — lanț transportor; 2 — motor; 3 — coș rotativ; 4 — ușă de încălzire; 5 — emițător ultrasonic; 6 — serpentine de răcire; 7 — pompă pentru introducerea lichidului; 8 — pompă pentru evacuarea lichidului.

În primul caz, al pieselor care pot fi vărsate, se întâlnesc două soluții practice. O primă soluție constă în transportarea pieselor cu ajutorul unui melc rotativ, așezat într-o cavitate în care se produc ultrasunete; la o altă soluție piesele se mișcă pe un fund în formă de sită, care este înclinat trecând prin dreptul unui emițător ultrasonic. În cazul primei instalații automatizate, arătată schematic în fig. 5.6, melcul este alimentat în mod continuu la partea inferioară, printr-un plan înclinat, fiind necesar a exista în această parte și un dispozitiv de dozare, spre a se evita o prea mare aglomerație a pieselor la intrarea în jghiabul melcului. La capătul superior, piesele curățate cad într-un dispozitiv corespunzător printr-un tub.

În fig. 5.7 este indicată schematic o instalație propice curățirii unor piese lungi și subțiri, cum ar fi ace, șuruburi, sau piese asemănătoare.

O altă instalație de curățire automată este arătată schematic în fig. 5.8. Se folosește în special în cazul pieselor de dimensiuni mici. Ele sînt introduse într-un coșuleț de sîrmă rotativ (3), dimensiunile cele mai indicate ale ochiurilor fiind cuprinse între 0,1 și 0,6 mm. Coșurile sînt transportate cu ajutorul unor lanțuri de transport (1) prin diferite camere ale instalației. În camera I piesele

sînt supuse acțiunii ultrasunetelor produse de către unul sau două emițătoare (5). Coșulețul se rotește pentru ca toate piesele conținute în el să fie expuse acțiunii ultrasunetelor. În băile următoare piesele sînt spălate, iar în ultima cameră are loc uscarea pieselor. Această ultimă operație se poate efectua de exemplu în aer fierbinte. După ce au fost curățate și uscate, piesele sînt îndreptate spre locul de descărcare, unde coșulețele trebuie scoase cu mîna și golate. O asemenea instalație poate avea un debit de 120 coșulețe pe oră. Caracteristica comună a tuturor acestor instalații automate cu ultrasunete constă în aceea că ele asigură un înalt grad de curățire, fiind deservite de un singur operator, care execută doar încărcarea și descărcarea, restul operațiilor fiind complet automatizate.

Eliminarea pietrei depusă pe suprafața cazanelor. Pentru eliminarea pietrei depuse pe suprafața interioară a unui cazan sau pe țevile fierbătoare de la cazanele cu aburi, evaporatoare etc. se procedează în mod obișnuit la spălarea acestora cu sodă calcinată și acid clorhidric. Pe timpul operației de curățire, producția trebuie întreruptă. Utilizîndu-se ultrasunete se împiedică formarea pietrei, operația fiind bazată pe acțiunea mecanică a mediului în vibrație asupra cristalelor care alcătuiesc crusta, făcînd ca aceasta să se desprindă de pe suprafața pe care s-a depus. La aceasta concură și fenomenul de cavitație.

În afară de acțiunea preventivă pe care o au ultrasunetele de a împiedica formarea unei cruste pe peretele interior al cazanului, acestea pot să curețe și crusta o dată formată. Astfel, pe cale experimentală s-a obținut o desprindere parțială și o afînare a unei cruste cu o grosime de 3 mm, după 7 zile de aplicare a energiei ultrasonice, iar după 3 săptămîni de ultrasonare continuă piatra a fost complet îndepărtată. Într-un alt caz instalația de ultrasonare a fost pusă în funcțiune o dată cu darea în exploatare a cazanului. După o funcționare continuă de 5 zile, pe suprafața de încălzire a cazanului s-a format un strat de piatră de 0,1—0,2 mm, care nu s-a mai îngroșat în intervalul de două luni și jumătate cît timp a rămas cazanul în funcțiune. Pe măsură ce se forma, piatra se elimina în urma acțiunii ultrasunetelor, împreună cu apa la purjarea sistematică a cazanului.

Pentru o asemenea operație sînt indicate ultrasunete avînd frecvențe joase, sub 30 kHz, emise fiind de transductoare magnetostrictive.

Curățirea pieselor din sticlă. Metoda ultrasonică a fost extinsă și pentru curățirea pieselor din sticlă. Astfel se folosește azi la înlăturarea reziduurilor din interiorul tuburilor din sticlă, în special a celor cu diametrul interior redus. Această operație poate fi efectuată fără a se opri procesul tehnologic de fabricație, ceea ce generează serioase economii.

De asemenea metoda ultrasonică este utilizată și în industria alimentară pentru spălarea borcanelor și a sticlelor. În acest caz baia de spălare are forma unui vas dreptunghiular. În interiorul recipientului sînt montate două șiruri concentrice de emițătoare magneto-strictive, în total 16, radiind energia acustică după o direcția radială. În felul acesta se formează o zonă de acțiune intensă a ultrasunetelor. În baie mai este montată o roată, care conține o serie de suporturi pentru plasarea borcanelor sau sticlelor. Roata acționată de un motor electric prevăzut cu un reductor se învîrtește în întregul inelar dintre emițătoarele magneto-strictive. Borcanele și sticlele fiind obligate a traversa cîmpul ultrasonic sînt curățate. Roata și suporturile sînt confecționate din oțel inoxidabil, pentru a nu fi corodate în urma cavitației.

Baia este prevăzută la partea sa inferioară cu un orificiu prin care se introduce lichidul de spălare. Se folosește în general apa, încălzită la o temperatură de 80—90°C. La fundul recipientului există un canal pentru scurgerea murdăriei care s-a depus pe fundul vasului în urma operației de curățire și o ușiță prin care se pot îndepărta eventualele cioburi.

O asemenea instalație construită în U.R.S.S. (AYM) lucrează cu o frecvență a ultrasunetelor de 21,6 kHz și are o productivitate de aproximativ 10.000 piese curățate pe oră. Puterea absorbită este de 10 kW.

Curățirea materialelor textile. Efectul produs de acțiunea ultrasunetelor în cazul curățirii țesăturilor și a materialelor fibroase este întrucîtva diferit de acela indicat la curățirea pieselor metalice. Datorită faptului că fibrele sînt reziliante, cavitația nu mai produce eroziuni sau ruperi din structura materialului. Cum în majoritatea cazurilor petele de murdărie de pe țesături sau de pe fibre sînt o combinație de particule solide și unsoare, în urma tratamentului cu ultrasunete al materialului textil imersat într-o baie de lichid se produce o emulsionare a unsoarei care leagă murdăria de fibră. În urma agitației puternice provocată de ultrasunete în lichid, particulele de murdărie sînt deslipite de pe fibră și precipitate apoi în recipientul în care are loc spălarea.

Eficacitatea procedeului depinde și în acest caz de o serie de parametri, printre care amintim: frecvența și intensitatea vibrațiilor ultrasonice, natura și temperatura lichidului în care se face spălarea, durata acțiunii ultrasunetului etc.

Cercetările de pînă acum arată că eficacitatea procedeului este cu atît mai mare cu cît frecvența vibrațiilor este mai mare. Nu pot fi utilizate însă ultrasunete de frecvență prea înaltă, datorită absorbției pe care o suferă ultrasunetele atunci cînd traversează materialul textil, absorbție care este cu atît mai accentuată cu cît materialul este mai dens

și mai gros și cu cât frecvența ultrasunetului este mai ridicată. Din acest motiv sînt indicate frecvențele joase ale domeniului ultrasonic.

În tabela 5.2 sînt date rezultatele unor cercetări cu privire la durata operației de curățire atunci cînd se folosesc unde acustice de diferite frecvențe, atît din domeniul audibil cît și din domeniul ultrasonic.

Tabela 5.2

	Soluția de spălare	Durata de spălare a probelor (minute)	
		50 °C	100 °C
Proba de control fără utilizarea vibrațiilor acustice	Nr. 1 Nr. 2	— —	180 150
Idem, cu folosirea vibrațiilor de 0,05 kHz	Nr. 1 Nr. 2	60 45	40 25
Idem, cu folosirea vibrațiilor de 0,01 kHz	Nr. 1 Nr. 2	60 50	40 30
Idem, cu folosirea vibrațiilor de 20 kHz	Nr. 1 Nr. 2	25 15	20 10
Idem, cu folosirea vibrațiilor de 120 kHz	Nr. 1 Nr. 2	35 25	25 20

În aceste experimentări, probele murdărite cu ulei și praf se spălau în două soluții apoase conținînd 0,6% săpun și 0,6% sodă (Soluția nr. 1) și 0,6% săpun și 0,6% OP-4 (Soluția nr. 2). Din examinarea datelor se constată că frecvențele care contribuie la accelerarea procesului de curățire sînt cele în jur de 20 kHz. Ca lichid în care este necesar a fi imersată țesătura se întrebuintează în general apa. Adăugarea unei cantități ușoare de săpun sau detergent sintetic s-a constatat a fi avantajoasă. Procesul se accelerează atunci cînd apa este încălzită la o temperatură mai mare. În cazul curățirii țesăturilor la care murdăria este foarte aderentă sau a pătruns adînc în fibră, ca lichid în cuva de spălare unde se crează un cîmp ultrasonic este indicat a se folosi tetracolorura de carbon și benzina.

5.2.3. Tratatamentul cu ultrasunete al metalelor topite. Primul studiu cu privire la influența ultrasunetelor de intensități mari asupra proceselor de solidificare a metalelor topite a fost efectuat de S. I. Sokolov. Acțiunea ultrasunetelor de frecvență cuprinse între 600 și 4500 kHz a fost urmărită la o serie de metale pure ca staniul, zincul și aluminiul.

Asemenea cercetări au fost continuate și extinse la un variat sortiment de metale. Această extindere a cercetărilor și a aplicării în practică a metodelor de tratament ultrasonic a metalelor topite, s-au dezvoltat mult în ultimii ani, datorită faptului că cu ajutorul vibrațiilor aplicate în timpul topirii sau solidificării se obține o îmbunătățire netă a calității metalului. Ea se produce ca urmare a efectelor fizice rezultate în urma acțiunii ultrasunetelor, și anume: degazarea masei de metal topite, reducerea mărimii granulelor metalice și dispersarea unui metal în altul. Toate aceste efecte sînt rezultatul fenomenului de cavitație, care se produce în masa lichidă a metalului atunci cînd are loc o iradiere cu ultrasunete de intensități mari.

Experiențele efectuate pentru a pune în evidență efectul de degazare au arătat că în cazul unui aliaj din aluminiu cu 40% cupru, avînd o greutate de 9 kg s-a produs o degazare aproape completă după o iradiere timp de 20 minute cu ultrasunete de frecvența de 26 kHz. Măsurarea densității a arătat că metoda ultrasonică este comparabilă în ceea ce privește acțiunea de degazare cu metoda care se bazează pe introducerea de clor. De asemenea, metoda cu ultrasunete a dat bune rezultate și în cazul degazării sticlei topite. Sticla este adusă la starea topită prin încălzire la o temperatură în jur de 1350°C. După o iradiere cu ultrasunete timp de 30 minute, pe toată durata de răcire, se obține o bună degazare. Această metodă oferă posibilități de aplicare la fabricarea sticlei optice, unde este necesar să se obțină o structură de sticlă complet omogenă.

În ceea ce privește formarea cristalelor, atunci cînd au fost aplicate ultrasunete, au fost obținute structuri mai compacte și cu o granulație mai fină decît în cazul solidificării obișnuite, fără tratament ultrasonic. Nu sînt încă precizate cauzele care produc fărâmițarea granulelor. Se pare că în afară de cavitație, această fărâmițare ar fi provocată și de frecarea internă a materialului produs sub acțiunea ultrasunetelor, care conduce la o distrugere a structurii sale cristaline. Prin iradiere cu ultrasunete, granulele au devenit mai uniforme, cu dimensiuni de 4—5 ori mai mici decît la metalul netratat. Aceste rezultate au putut să fie observate studiindu-se structura lingourilor de metal cu ajutorul metalografului (fig. 5.9).

Cercetările recente au arătat că gradul de fărâmițare al granulelor datorită vibrațiilor aplicate pe timpul solidificării depinde de mai multe condiții:

— finețea granulelor devine mai mare, atunci cînd solidificarea se produce mai lent;

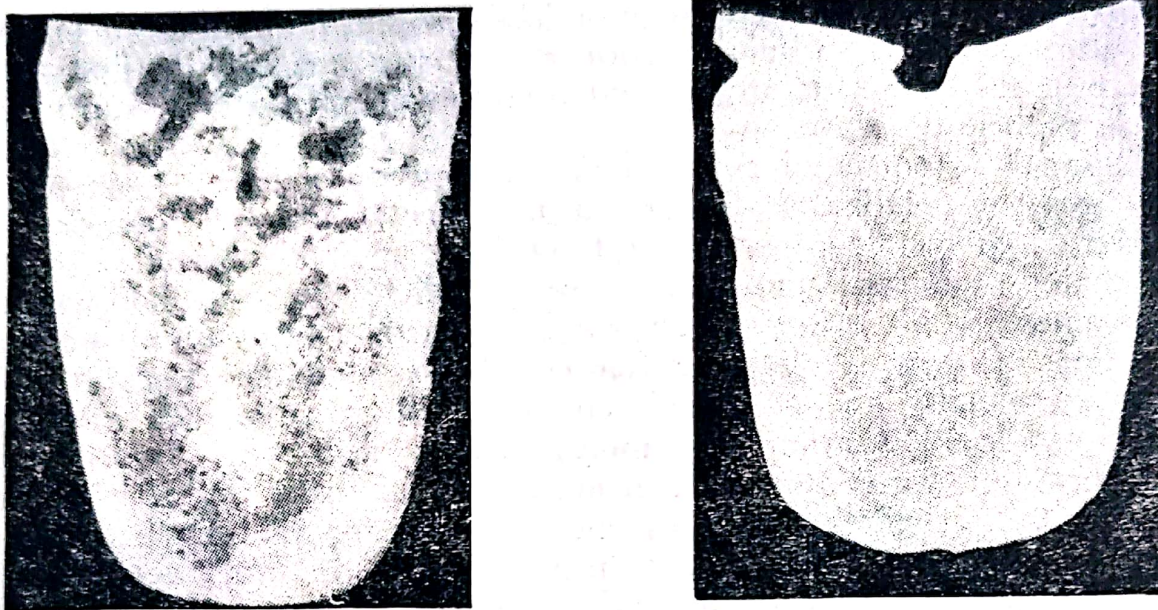


Fig. 5.9. Efectul tratării ultrasonice a metalelor topite:
a — lingou de aluminiu normal; *b* — lingou de aluminiu tratat cu ultrasunete.

— într-un sistem de aliaj dat, finețea granulelor este mai pronunțată la conținuturi aliate mai joase;

— pe măsură ce intensitatea acustică crește, granulația devine mai fină, însă peste o anumită valoare a intensității ultrasunetului se obțin creșteri foarte mici ale fineții granulelor care nu justifică efortul de mărire al intensității. O intensitate favorabilă este în jur de $2 \dots 2,5 \text{ W/cm}^2$;

— se produce o fărâmițare mai pronunțată a granulelor în special în acele aliaje în care predomină în structură soluții solide;

— în banda de frecvență cuprinsă între 20—1000 kHz se pare că finețea granulelor nu depinde de frecvența vibrațiilor, mai curînd depinde de produsul dintre frecvență și amplitudinea vibrațiilor;

— vibrațiile de frecvență mai ridicate devin mai eficace, deoarece prin dirijarea lor, concentrarea energiei acustice în masa metalului topit se poate face cu mai multă ușurință. Pe măsură ce se mărește frecvența, se ajunge la o distribuție mai bună a carburilor, cu alte cuvinte se obține o reducere dimensională a rețelei de carburi;

— pentru ca să se producă fenomenul de cavitație, este necesar ca intensitatea acustică să depășească pragul limită corespunzător. În cercetările experimentale s-au folosit și ultrasunete avînd intensități de ordinul waților/cm² și chiar intensități mult mai mari de cîteva zeci de wați/cm².

Prin favorizarea fărâmițării granulelor cu grafit în fonta cu magneziu, ultrasunetele contribuie la obținerea de structuri stabile fiind accelerat procesul de grafitizare și fiind înlăturat complet stratul superficial dur la probele de fontă.

Datorită fenomenului de cavitație, care produce unde de șoc puternice, se poate realiza o dispersie a unui metal în altul, obținându-se amestecuri de metale care nu pot fi obținute în mod obișnuit. Procesul este analog producerii emulsiilor dintre două lichide care în mod obișnuit nu se amestecă. Ca urmare a acțiunii ultrasunetelor, au putut fi obținute noi aliaje, cum ar fi aliaje de fier cu plumb, aluminiu cu cupru, aluminiu cu plumb, zinc cu plumb etc. Prin ultrasonarea unei soluții de zinc și oțel la 500°C, timp de 5 minute și apoi răcit rapid, tot sub acțiunea vibrațiilor, s-a constatat că în masa zincului fusese dispersată o cantitate de 0,2% oțel. Incorporarea unui mic procentaj de plumb în metale ușoare prezintă avantaje evidente prin faptul că în urma acestei înglobări, metalele de bază devin mai maleabile și mai ductile. Dispersia plumbului în masa metalului, se face sub forma unor granule fine, având diametrul în jur de 40 microni. Au fost efectuate experiențe cu rezultate interesante cu privire la înglobarea unor particule nemetalice în masa unui metal prin aplicarea unui tratament cu ultrasunete. În felul acesta s-a putut introduce până la 25% grafit într-o masă de bronz, în particule foarte fine și foarte disperse. S-a obținut astfel un material cu proprietăți de antifricțiune superioare, foarte indicat pentru fabricarea lagărelor.

Îmbunătățirea calității metalelor supuse acțiunii ultrasunetelor poate fi pusă în evidență prin examinarea unor parametrii mecanici, care caracterizează orice metal. Ne referim la rezistența mecanică, la densitatea și duritatea materialului. Astfel, în urma tratamentului ultrasonic, rezistența la întindere a duraluminiului a crescut cu 3 kgf/mm². Ca rezultat al tratamentului acustic fragilitatea antimonului s-a redus considerabil, duritatea Brinell crescând de la 34 la 54 unități, iar a duraluminiului a crescut de la 78 la 96 unități. În plus, la unele oțeluri limita de deformare a crescut până la 4,5 ori, iar capacitatea de alungire a devenit de trei ori mai mare, lucru ce are o mare importanță în operația de laminare. Cercetările efectuate cu privire la efectele vibrațiilor ultrasonore asupra aluminiului topit, au arătat o creștere a densității cu 60%. În aceste cercetări au fost folosite ultrasunete având frecvența de 49 kHz.

Cu toate că cercetările efectuate în acest domeniu care au început cu mulți ani în urmă și cu toate rezultatele experimentale favorabile, totuși procedeul de tratament sonic al metalelor topite nu și-a găsit încă aplicare mai largă în industrie. Aceasta se datorește în special greutatea de

aplicare a tratamentului acustic unei cantități mai mari de metal topit și dificultății de cuplaj dintre emițător și masa metalului topit aflată la temperaturi ridicate ($500 \dots 2000^{\circ}\text{C}$); în instalațiile realizate pînă acum sînt folosite aproape exclusiv emițătoare magnetostrictive. Datorită condițiilor specifice de lucru, emițătorul nu poate fi introdus în masa materialului topit, cuplajul dintre emițător și mediul ultrasonat făcîndu-se prin intermediul unei bare. În acest caz, răcirea emițătorului este mult simplificată, bara permițînd disiparea unei cantități mai mari de căldură. Sînt numeroase situații cînd iradierea cu ultrasunete trebuie să aibe loc pe toată durata răcirii metalului topit. Folosirea barelor de cuplaj se impune cu atît mai mult în asemenea cazuri pentru a permite scoaterea cu ușurință a aparatului din masa metalului, atunci cînd acesta s-a solidificat.

În instalațiile pentru tratarea acustică a metalelor topite au fost încercate și emițătoare cu cristale. Totuși rezultate mai bune au fost obținute cu emițătoare magnetostructive, care pot produce ultrasunete de puteri mari în banda frecvențelor joase utilizată și care rezistă mai bine la temperaturi ridicate.

În urma încercărilor efectuate în ultimul timp, rezultă că folosirea ultrasunetelor mai poate fi deosebit de eficace la tratamentul de revenire, de călire izotermică și de îmbătrînire folosite pentru stabilizarea structurilor aliajelor și a oțelurilor aliate. Astfel s-a constatat că sub acțiunea undelor ultrasonice cu o frecvență de 30 kHz și o intensitate de 10 W/cm^2 procesul de îmbătrînire naturală a duraluminiului se accelerează de 60—80 ori.

Ca urmare, numeroase cercetări efectuate în legătură cu fenomenul de călire prin precipitare, s-a stabilit că vibrațiile ultrasonice accelerează desfășurarea acestui proces la o serie de aliaje, din materiale feroase și neferoase, și probabil pot da rezultate pozitive prin efectul ce-l au asupra proceselor de îmbătrînire și al altor aliaje, ca de exemplu bronzul de beriliu.

Cum ultrasunetele pot produce o scădere a coeziunii structurii cristaline, metalele supuse acțiunii acestora devin mai active din punct de vedere chimic, ele fiind mai receptive la agenții chimici. În ceea ce privește permeabilitatea metalelor față de gaze, ultrasunetele par să aibe o acțiune similară cu aceea pe care o are căldura. Prin tratament termic se produce o dilatare a metalului, moleculele sale depărtîndu-se unele de altele lăsînd să pătrundă cu ușurință gazul. În cazul tratamentului ultrasonic, dilatările succesive care au loc în cursul propagării undelor fac ca gazul să poată fi difuzat în interiorul metalului.

S-a căutat să se folosească aceste efecte pentru a se îmbunătăți procesul de nitrurare a oțelurilor. Astfel, s-a constatat că o bară de oțel conținând 0,35% carbon, 3% nichel, 3% crom, 1% molibden și 0,25% siliciu, după un tratament ultrasonic timp de 9 ore într-un curent de amoniac la 500°C a suferit o serie de schimbări în proprietățile sale mecanice. Astfel, duritatea a crescut de la 380 uB la 1033 uB, rezistența la întindere a crescut apreciabil, iar penetrația hidrogenului a crescut de peste 3 ori. Fără aplicarea tratamentului de înaltă frecvență adâncimea nitrurării era numai de 1% și nu s-a semnalat nici o schimbare a proprietăților mecanice ale oțelurilor. În plus, procesul de nitrurare a fost considerabil accelerat prin aplicarea vibrațiilor de înaltă frecvență. Trebuie menționat că prin tratamente ultrasonice pot fi efectuate unele procese la temperaturi mai coborâte fără o scădere a eficacității.

Efectele produse de ultrasunete asupra corpurilor mecanice în stare solidă au permis să se pună la punct și procedee ultrasonice pentru placarea electrolică. În operațiile de nichelare, unul din avantajele principale pe care le oferă iradierea cu ultrasunete constă din aceea că nu mai este nevoie a fi menținută cu rigurozitate o anumită temperatură, de vreme ce poate fi tolerată o creștere a intensității curentului electric de 3 ... 5 ori, fără arderea stratului metalic. În plus, se mărește aderența datorită faptului că ultrasunetele îndepărtează orice urmă de unsoare.

În operațiile de cromare electrolică, folosirea ultrasunetelor are un dublu scop, pe de o parte să sporească densitățile de curent electric pe

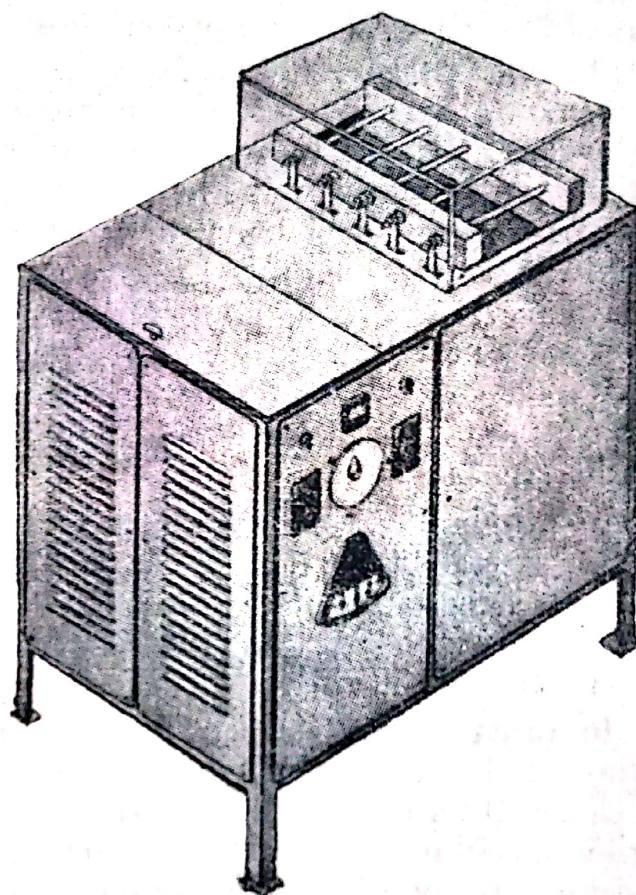


Fig. 5.10. Instalație cu ultrasunete pentru acoperiri galvanice.

timpul depunerii și pe de altă parte să îmbunătățească puterea de depunere. De asemenea ultrasunetele au fost întrebuințate cu bune rezultate și la placările în băile de cianură de argint. În toate cazurile de placări, electrolitice, frecvența cea mai potrivită a ultrasunetelor întrebuințate pare a fi în jur de 20 kHz și se pare că tocmai folosirea în trecut a ultrasunetelor cu frecvență excesiv de ridicate, a făcut ca rezultatele să fie mai slabe decât cele obținute în prezent.

Au fost construite instalații industriale de accelerare cu ultrasunete a acoperirilor galvanice (argintare, cuprare, cromare etc.). Cîmpul ultrasonic în baie este produs de două emițătoare magnetostrictive, fixate pe pereții laterali ai băii (fig. 5.10). Frecvența de lucru este 19,5 kHz, iar puterea nominală a emițătorului este de 2,5 kW.

5.2.4. Sudura cu ajutorul ultrasunetelor. Sudarea pieselor metalice. Sudarea unor metale ca aluminiu, magneziu, aliajele de aluminiu, nu este posibilă prin folosirea procedeelor obișnuite datorită unei oxidări instantanee a suprafețelor acestor metale. În contact cu aerul se formează imediat o peliculă de oxid, care cu toate că este foarte subțire, avînd o grosime de o miime de micron, totuși este foarte rezistentă și în același timp rea conducătoare de electricitate. Formarea acestei pelicule face imposibilă îmbinarea unor asemenea metale. Prin aplicarea simultană la piesele respective a energiei vibrațiilor de frecvență ridicată și a unor eforturi mici de compresiune, îmbinarea devine posibilă.

Mecanismul de producere al sudurii a fost studiat relativ puțin pînă în prezent, totuși se pare că se datorește fenomenului de cavitație, care contribuie la înlăturarea peliculei de oxid de pe suprafața metalică și fenomenului de absorbție, care prin ridicarea temperaturii realizează o scurgere plastică a metalului la locul de aplicare al ultrasunetelor. Prin urmare această metodă de sudare se desfășoară fără topire, lucru confirmat de cercetările metalografice și termice. Pe cale experimentală și prin calcul s-a stabilit că temperatura în zona sudurii variază de la 200° la 550°C, în funcție de materialul care se îmbină, de durata sudării, de presiunea de contact și de amplitudinea vibrațiilor ultrasonice. Astfel, în cazul aluminiului temperatura pe timpul sudării este în jur de 400°C, inferioară temperaturii de topire care este după cum se știe de 658°C.

Cu toate că are loc o încălzire a materialului, totuși nu se produce o topire a acestuia, astfel încît se poate afirma că procesul de sudare se desfășoară la rece și fără o curgere a materialului. Ca urmare, suprafața pieselor nu este aproape de loc deteriorată; se observă numai o ușoară asperizare. Procesul este indicat în special la sudarea foilor metalice subțiri, precum și a foilor și a tablelor cu sîrme.

Sudarea cu ajutorul ultrasunetelor poate fi efectuată prin puncte sau prin cusătură continuă, ambele procedee fiind în prezent puse la punct, elaborându-se tehnologia completă și fiind creat aparatul necesar. În acest scop se folosește un transductor magnetostrictiv (1), străbătut de o bobină (2) prin înfășurarea căreia circulă un curent de înaltă frecvență. În vederea răcirii sale, transductorul este cufundat într-un recipient special în care circulă apa. Vibrațiile transductorului se transmit concentratorului exponențial sau conic (3) și apoi capului special (6) (fig. 5.11). Întocmai ca și în cazul perforatoarelor ultrasonice și aici concentratorul sau transformatorul acustic servește la mărirea amplitudinilor vibrațiilor

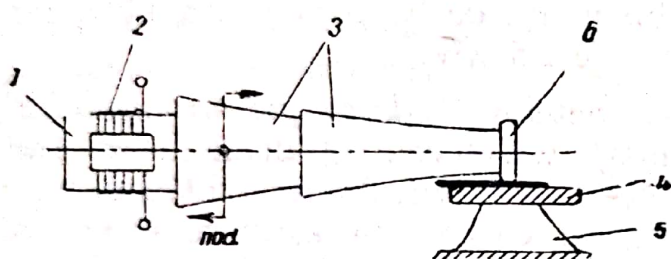


Fig. 5.11. Principiul sudurii cu ultrasunete a pieselor metalice:

1 — transductor magnetostrictiv; 2 — bobinaj; 3 — transformator acustic; 4 — piesele care se sudează; 5 — suport; 6 — cap de sudură.

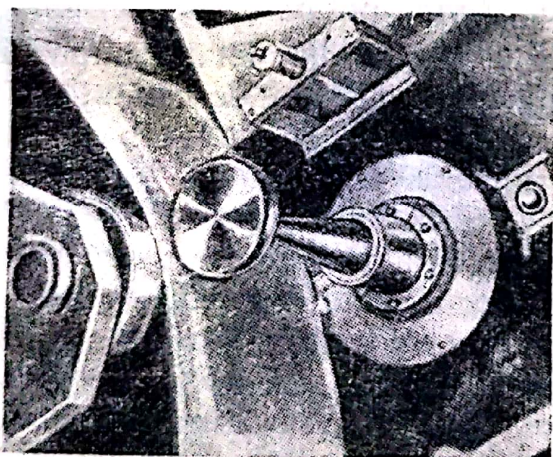


Fig. 5.12. Instalație cu ultrasunete pentru sudură cu cusătură continuă.

prodate de transductor. Pentru ca vibrațiile să nu fie amortizate, prinderea barei concentratorului se face într-un punct nodal. Presiunea la locul de contact se creiază cu ajutorul unui sistem de pîrghii și este preluată de reazemul plan (5) pe care sînt așezate piesele (4) care trebuie îmbinate. Capul de sudură, care îndeplinește rolul unuia din electrozi, poate fi montat la sculă (concentrator) prin filet, prin lipire sau el poate fi confecționat dintr-o bucată cu scula. În cazul instalațiilor de sudură prin puncte, capul de sudură are forma unui știft, confecționat din oțel călit sau alt metal dur. Capul de sudare are o formă sferică, cu raza de 25—50 mm. La sudarea materialelor dure este rațional să se folosească sfere cu raze cît mai mici. În general în instalațiile de sudare cu ultrasunete nu sînt utilizate trans-

Vibrațiile longitudinale ale capului, produc, în elementele ce trebuie îmbinate, eforturi unitare tangențiale, datorită forțelor de frecare. În cazul sudării cu cusătură continuă, piesele care urmează a fi îmbinate sînt strînse între două role, din care una este purtătoare de vibrații mecanice, care-i sînt imprimate de concentrator. În rest, instalația este analogă cu cea folosită la sudarea prin puncte (fig. 5.12).

O instalație fixă de sudare cu ajutorul ultrasunetelor cuprinde următoarele părți principale: emițătorul și generatorul ultrasonic, concentratorul, scula de sudare, batiul, mecanismul de presiune și releul de timp.

În prezent a fost stabilită o serie de parametrii tehnologici, de care depinde procesul îmbinării în cursul sudării prin ultrasunete și anume: presiunea de contact, amplitudinea vibrațiilor ultrasonice, frecvența vibrațiilor ultrasonice și timpul de sudare.

a) Presiunea de contact este variabilă în funcție de duritatea și grosimea materialului de sudat și crește odată cu mărirea limitei de curgere. Pentru sudarea foilor de aluminiu de 0,5 mm grosime, forța de apăsare optimă la locul de contact este aproximativ de 30—35 kgf, iar în cazul duraluminiului placat avînd o grosime de 1,2 mm, această forță este în jur de 70 kgf. Nu este rațional să se depășească aceste limite în vederea obținerii unor rezistențe mai mari ale îmbinării, cu atît mai mult cu cît o presiune de contact prea mare duce la mărirea deformației suprafeței piesei, lucru ce are repercusiuni asupra rezistenței îmbinării. Presiunea de contact necesară se realizează cu ajutorul unui dispozitiv mecanic, fie cu pîrghii și greutate, fie hidraulic sau pneumatic. Acest dispozitiv se găsește montat obișnuit în masa aparatului.

b) Durata sudării, adică durata acționării vibrațiilor ultrasonice asupra piesei, are, în funcție de condițiile de lucru și de proprietățile și grosimea materialului, diferite valori critice pentru care rezistența îmbinării devine maximă. În general pentru table de aluminiu, durata sudării unui punct variază între 0,5 și 2,0 s, iar pentru table de duraluminiu între 1,0 și 4,0 s, funcție de grosimea tablei. O acțiune mai îndelungată a ultrasunetelor poate duce la distrugerea suprafeței piesei la locul de contact și la apariția unor fisuri, atît interioare cît și la suprafață. Un releu de timp asigură o dozare precisă a duratei de iradiere cu ultrasunete. Pentru a răspunde cerințelor specificate mai sus, se construiesc releu de timp cu întârzieri între 0,1 și 15 s.

c) Problema determinării unei frecvențe optime pentru efectuarea sudării cu ajutorul ultrasunetelor a fost puțin studiată. Se poate afirma însă că sudarea materialelor cu grosimi mai mici necesită frecvențe mai ridicate decît cele care au grosimi mari. Dacă s-ar utiliza frecvențe înalte,

absorbția ar fi mărită, însă producerea cavitației ar fi mult îngreunată. În plus asigurarea unor dimensiuni mici ale elementului care vibrează pune probleme serioase de montaj și de cuplaj. De aceea la marea majoritate a instalațiilor de sudură se lucrează cu o frecvență a ultrasunetelor în jur de 20 kHz.

d) Amplitudinea vibrațiilor are influență atât asupra rezistenței îmbinărilor, găsindu-se pe baza cercetărilor efectuate valori optime, cât și asupra vitezei de lucru. Dacă amplitudinile vibrațiilor ultrasonice sînt reduse, rezistența îmbinării este de asemenea redusă, iar la valori ale amplitudinii mai mici de 6μ se constată că îmbinarea nu se mai produce. Prin folosirea amplitudinilor mari ale ultrasunetelor a fost posibilă în multe cazuri reducerea considerabilă a timpului de sudare. Aceasta reprezintă o altă cale pentru mărirea productivității procesului. Totodată prin mărirea amplitudinilor vibrațiilor se poate mări grosimea tablelor ce pot fi îmbinate. Trebuie precizat însă că o mărire excesivă a amplitudinilor vibrațiilor poate dăuna procesului de sudare, deoarece datorită amplitudinilor mari, materialul de sudare are tendința de a fi proiectat sub forma unei picături mici și suprafața pe care se poate face îmbinarea este micșorată. În funcție de natura materialului care se sudează și de grosimea tablelor, amplitudinile indicate sînt: 14—16 μ pentru aluminiu și 20—22 μ pentru duraluminiu, cînd rezistența îmbinării devine maximă.

Necesitățile de putere pentru sudarea cu ajutorul ultrasunetelor sînt sensibil mai reduse decît la alte procedee de sudare. De exemplu, pentru sudarea tablelor de aluminiu de 1,25 mm cu procedeele clasice este nevoie de 50—70 kVA, în timp ce sudarea cu ultrasunete a acelorași table poate fi făcută numai cu 4 kVA.

În afară de parametrii menționați mai sus, calitatea îmbinării mai depinde și de alți factori printre care se numără rezistența materialului din care este confecționat capul de sudare, de starea acestuia și a reazemului, grosimea pieselor ce se îmbină.

Măsurîndu-se rezistențele sudurilor efectuate cu ajutorul ultrasunetelor, au putut fi deduse o serie de concluzii cu privire la posibilitățile metodei, așa după cum se vede din tabela 5.3.

Din datele cuprinse în tabel se constată în mod clar că procedeul ultrasonic dă satisfacție la îmbinarea tablelor subțiri sau la îmbinarea unei table sau fir subțire cu o tablă groasă sau cu o placă de grosime nelimitată; ori asemenea operații se întîlnesc în mod frecvent în industria metalurgică, electrotehnică și electronică. Limita superioară a grosimii tablelor, care pot fi îmbinate depinde de natura materialului acestor table.

Tabela 5.3

Natura metalului	Grosimea tablelor mm	Caracterizarea sudurii
Cupru	0,05+ 0,05 0,05+ 0,5 1,2 + 1,2 0,05+30	bună satisfăcătoare insuficientă bună
Aluminiu	0,1+ 0,1 0,6+ 0,6 1,2+ 1,2 0,1+30	bună satisfăcătoare nesatisfăcătoare satisfăcătoare
Aluminiu+cupru	0,1+ 0,05 0,1+30 0,6+ 0,1	satisfăcătoare bună satisfăcătoare
Oțel austenitic	0,1+ 0,1	satisfăcătoare

O importanță deosebită în tehnica sudării cu ultrasunete o prezintă așezarea corectă a sculei față de suprafața piesei în poziția de lucru. Cele mai bune rezultate au fost obținute prin așezarea acestora perfect orizontală. La așezarea sculei cu axa înclinată, în aceasta apar vibrații transversale, care influențează negativ calitatea îmbinărilor. La sudarea pieselor de grosimi diferite se recomandă a se aplica capul de sudare pe piesa mai subțire și regimul de sudare se alege corespunzător grosimii acestora.

Pe lângă instalațiile fixe, au fost construite și aparate portative de sudare cu ultrasunete, avînd forma de pistol. La aceste dispozitive presiunea necesară operației de sudare se realizează obișnuit prin apăsare cu mîna, efortul mărindu-se prin intermediul unor pîrghii. Asemenea aparate sînt utilizate tot mai mult la sudarea șasiurilor de aluminiu ale aparatelor electronice și la lipirea plăcilor condensatorilor. La instalațiile de antene pentru microunde s-a reușit pentru prima dată prin lipirea cu ultrasunete să se înlăture zgomotele ce apăreau inevitabil în urma îmbinărilor mecanice (fig. 5.13).

În trecut, tablele sau firele de aluminiu erau înlocuite cu table și fire de cupru, un metal mai scump, deoarece nu era posibilă aplicarea procedeelor obișnuite de sudare. În prezent prin punerea la punct a metodei de sudură cu ajutorul ultrasunetelor, utilizarea aluminiului și a aliajelor sale se extinde apreciabil.

În afară de aparatele portative de sudare cu ultrasunete, au fost create și ciocane de lipit cu ultrasunete. În acest caz, îmbinarea se efectuează prin lipire cu un metal topit, vibrațiile ultraacustice având rolul de a înlătura pelicula de oxid de pe suprafețele care se îmbină. Pentru

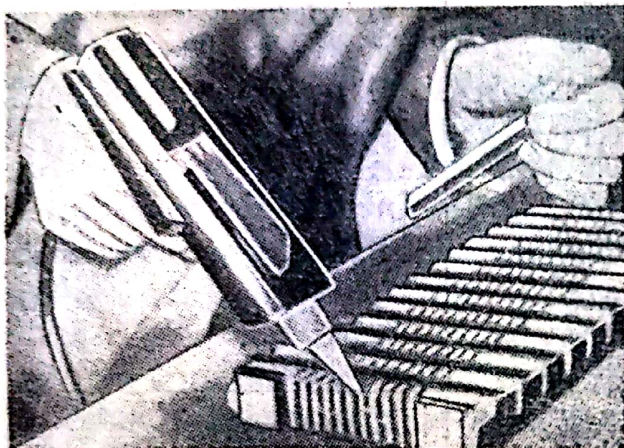


Fig. 5.13. Instalație portabilă de sudură cu ajutorul ultrasunetelor.

lipirea pieselor din aluminiu se folosesc cositorul pur, aliajele de cositor cu zinc și cositor cadmiu, un bun aliaj fiind și acela care conține 80% cositor și 20% zinc. Pentru topirea cositorului sau a aliajelor sale, capul ciocanului trebuie încălzit, în care scop este prevăzut cu un bobinaj separat. Cercetările au arătat că temperaturile indicate sînt cuprinse între 180° și 350°C. Dacă se mărește temperatura, lipirea nu mai este atît de intensă. Dispozitivul lucrează cu ultrasunete de frecvență cuprinse obișnuit între 20 și 30 kHz.

Lipirea în special a firelor de aluminiu se mai poate efectua într-o baie de lichid iradiat cu ultrasunete. Principiul de funcționare este analog cu cel arătat la ciocanul de lipit, cu singura deosebire că piesele care urmează a fi îmbinate se introduc într-o baie umplută cu cositor, sau aliaj de cositor, în care există un cîmp ultrasonic. Sub acțiunea vibrațiilor ultrasonice, în aliajul topit apare cavitația, care favorizează lipirea pieselor imersate în baie. Ultrasunetele sînt produse cu ajutorul unui emițător magnetostrictiv montat la fundul recipientului, frecvența lor fiind în jur de 20 kHz.

Au fost create instalații conținînd băi și mai mici, ca de exemplu instalația pentru lipire cu ultrasunete tip Mulard, la care baia are un volum de 60 cm³. Instalația este prevăzută cu un emițător magnetostrictiv lucrînd la o frecvență de 25 kHz, iar puterea maximă a generatorului ultrasonic este de 250 W.

Trebuie menționat că folosirea băilor de lipire este oarecum limitată, atît în ceea ce privește mărimea pieselor care pot fi lipite, cît și în ceea ce privește productivitatea. Cavitația cea mai intensă fiind în imediata vecinătate a emițătorului, ea dispărînd aproape complet în afara zonei de radiație a emițătorului, rezultă că locul îmbinării trebuie situat neapărat în zona cu cavitație maximă. S-a încercat să se înlătorească această deficiență fie prin mărirea puterii de radiație a emițătorului, fie prin

utilizarea unui emițător mobil, care se deplasează în lungul suprafeței de tratat, aceasta în cazul îmbinărilor pe suprafețe mari.

Sudarea pieselor metalice cu ajutorul ultrasunetelor îmbunătățește mult proprietățile metalice ale îmbinărilor sudate. Aceasta se datorește probabil modificării condițiilor de cristalizare a băii de sudură și schimbării dimensiunilor granulelor de metal, acestea devenind mai fine. În plus, datorită fenomenului de cavitație, are loc și o evacuare a gazelor cuprinse în masa materialului topit. Ca urmare a acestor procese, densitatea cusăturilor se mărește, ca și duritatea acesteia, observîndu-se o micșorare sensibilă a porozității materialului din care este constituită cusătura.

Sudura cu ultrasunete a materialelor plastice. Rezultatele favorabile obținute în procesele de sudare a pieselor metalice cu ajutorul ultrasunetelor au făcut ca acestea să fie utilizate și la sudarea materialelor plastice, atît de grosimi mici, cît și de grosimi apreciabile (pînă la cca. 10 mm). Au fost create instalațiile adecvate, care permit sudarea atît a materialelor plastice între ele, cît și a unui material plastic cu un metal. Însă dacă în cazul sudării pieselor metalice, deplasarea creată de vibrațiile ultrasonice și direcția de aplicare a presiunii sînt perpendiculare între ele, în cazul sudării materialelor plastice nu au putut fi obținute rezultate pozitive decît atunci cînd deplasarea și presiunea acționează în aceeași direcție. În felul acesta apar tensiuni normale la locul de sudare și nu tangențiale ca în cazul sudării metalelor.

Ca urmare a condițiilor arătate mai sus, axa conductorului de unde și aceea a brațului de apăsare, inferior, sînt situate în aceeași direcție, perpendiculară pe suprafețele care se sudează. În rest instalația este asemănătoare cu cea folosită la sudarea pieselor metalice.

La sudarea materialelor plastice, vibrațiile ultrasonice, introduse în produsele care urmează a fi îmbinate, produc o încălzire în locul de contact din cauza absorbției mari în material a energiei acustice. Suprafețele încălzite se sudează sub acțiunea unei forțe de strîngere exterioare. Prin acest procedeu au putut fi îmbinate foarte bine diferite materiale plastice, cum sînt: sticlă organică, viniplast, polietilen, clorvinil, capron primar și secundar, nylon etc. Rezultatele cele mai bune au fost obținute la sudarea materialelor plastice și a celor polimerizate cu catene lungi.

Durata procesului de sudare depinde de grosimea și proprietățile materialului, ea este însă foarte redusă. La sudarea prin puncte și prin presiune, durata de acționare a vibrațiilor se reglează în intervalul 0,1—8 s. Astfel o foiță de polietilen de 0,1—0,25 mm grosime a fost sudată prin puncte la o apăsare de 5 kgf și o durată de sudare a unui punct de 2 s. La încercarea de desprindere, în toate cazurile ruperea s-a produs în afara cusăturii.

În tabela 5.4 sînt indicate cîteva durate de sudare, precum și forța aplicată la punctul unde are loc îmbinarea.

Tabela 5.4

Natura materialului	Grosime mm	Forța aplicată Kgf	Durata sudării s	Rezistența la rupere Kgf/cm ²
Viniplast	5	40	3	230
Viniplast	10	85	3	240
Sticlă organică	10	80	2	—

Instalațiile moderne de sudură cu ajutorul ultrasunetelor permit efectuarea operației în mod continuu. În felul acesta au putut fi îmbinate foițe de polietilen avînd grosimi de 0,1—0,25 mm cu o viteză maximă de 30 m/oră.

Faptul că în urma aplicării ultrasunetelor energia termică se concentrează numai la locul de sudură, constituie un mare avantaj al acestei metode de sudare.

5.2.5. Depunerea particulelor cu ajutorul ultrasunetelor. *Depunerea particulelor aflate în suspensie în gaze.* În numeroase industrii există necesitatea aglomerării și depunerii particulelor fine lichide sau solide aflate în suspensie într-un mediu gazos, fie în scopul recuperării unei apreciable cantități de material, care s-ar pierde în mod inutil, fie în scopuri igienice căutînd a se purifica aerul de substanțele nocive organismului omului. Astfel la fabricarea acidului sulfuric trebuie efectuată precipitarea ceții constituită din picături fine de acid în suspensie într-un curent gazos foarte rapid. În fabricile de ciment este nevoie de a se precipita particulele de praf ce se găsesc în suspensie în aer. De asemenea este necesar a se recupera din aerul sau fumul care se evacuează: negrul de fum, oxidul de zinc, alcali minerali, sau alte particule provenite pe timpul procesului de fabricație. În plus în multe alte procese tehnologice, cum ar fi de pildă la fabricarea penicilinei, se produc suspensii de diferite particule ale unor produse destul de valoroase, care trebuie recuperate.

Se cunosc în prezent mai multe metode de precipitare a particulelor în suspensie într-un gaz, printre care cele mai moderne și mai eficace sînt metodele electrostatice și ultrasonice.

Depunerea ultrasonică se produce ca rezultat al aglomerării particulelor fine, a căror masă crește, putînd deveni de cîteva mii de ori mai

mare decât masa particulelor primare. Asemenea grupări, neputându-se menține în suspensie, pot fi captate cu mai multă ușurință și astfel depuse. Aceste aglomerări de particule se formează în urma ciocnirilor care au loc între particule, ciocniri care se produc datorită acțiunii undelor ultrasonice puternice. În consecință, în mediul în care se găsesc particulele în suspensie trebuie creat un câmp de unde acustice staționare, aglomerările producându-se la noduri.

Mecanismul fizic care stă la baza aglomerării particulelor fine într-un câmp sonor este destul de complex și nu este încă pe de-a întregul clarificat. Totuși în prezent sînt precizate cîteva cauze care produc aglomerarea. În primul rînd, sub acțiunea cîmpului acustic, particulele fine, care pot urma cu ușurință mișcările vibratorii ale mediului gazos, sînt puse și ele în vibrație, în timp ce particulele mai mari sînt mai dificil deplasate din poziția lor inițială. Din această diferență între posibilitățile de a urmări vibrațiile particulelor gazului, rezultă ciocnirile dintre diferitele particule care dau naștere apoi fenomenelor de aglomerare menționate mai sus.

Notînd cu x_p amplitudinea de vibrație a particulelor și cu x_g amplitudinea de vibrație a mediului gazos, raportul dintre aceste mărimi este dat de relația

$$\frac{x_p}{x_g} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi\rho_p r^2 f}{9\eta} \right)^2}}$$

unde f este frecvența cîmpului acustic, r raza particulei, ρ_p densitatea particulei și η viscozitatea cinematică a gazului.

Cercetările au arătat că cele mai favorabile condiții pentru aglomerare sînt acelea corespunzătoare valorilor

$$0,2 < \frac{x_p}{x_g} < 0,8.$$

În al doilea rînd, procesul de aglomerare se bazează pe o extindere a principiului lui Bernoulli referitor la scurgerea fluidelor, aplicat de această dată la deplasarea particulelor într-un câmp de unde staționare. Conform acestui principiu, scurgerea unui fluid între două corpuri sferice provoacă o atracție a acestora, forța de atracție devenind maximă atunci cînd direcția scurgerii este perpendiculară pe linia centrelor celor două sfere. Forțe de atracție de tip Bernoulli apar în mod analog și între particulele aflate în suspensie într-un mediu gazos supus acțiunii ultrasunetelor. Forța de atracție este proporțională cu cubul razelor parti-

culelor și cu pătratul vitezei relative a particulelor și gazelor și invers proporțională cu distanța dintre particule la puterea patra. Rezultă că fenomenul este în particular important în cazul aerosolilor cu mare concentrație (distanțe mici între particule), precum și în cazul unor particule cu volum mai mare.

În fine, aglomerarea mai este rezultatul acțiunii presiunii de radiație acustică. Aceasta produce o concentrație a particulelor în zone distanțate între ele cu o jumătate de lungime de undă, corespunzând nodurilor și antinodurilor.

În urma cercetărilor efectuate s-a ajuns la concluzia că eficacitatea operației și viteza de precipitare a particulelor în suspensie depinde de mai mulți factori și anume: intensitatea și frecvența ultrasunetelor, durata tratamentului ultrasonic, concentrația aerosolului, granulozitatea și natura particulelor.

a) Intensitatea acustică este unul din factorii cei mai importanți în obținerea unei eficacități sporite, știind că această eficacitate este cu atât mai mare cu cât intensitatea acustică este mai mare. S-a stabilit o valoare limitată, a intensității, sub care procesul nu mai are loc. Ca limită inferioară este indicată intensitatea de 10^{-3} W/cm², căreia îi corespunde un nivel de intensitate acustică de 130 dB, considerat peste pragul de audibilitate. Rezultate favorabile se obțin cu intensități de ordinul a 0,1—1 W/cm² echivalând aproximativ cu un nivel de intensitate acustică de 150—160 dB peste pragul de audibilitate.

Acestea implică folosirea în instalațiile industriale de emițătoare de ultrasunete foarte puternice, care să permită radiația în medii gazoase a unei energii maxime. În prezent sînt utilizate aproape în exclusivitate sirene ultrasonice prevăzute cu reflector pentru concentrarea energiei acustice. Nu sînt folosite emițătoare magnetostrictive sau piezoelectrice care lucrează cu randamente foarte scăzute în gaze. S-a reușit ca prin folosirea sirenelor statice și dinamice să se realizeze densități, de energie de mai multe sute de ergi pe centimetrul cub, ceea ce corespunde unei intensități a ultrasunetului de cîțiva wați pe centimetrul pătrat, sau unei amplitudini de vibrație de cîțiva zeci de microni. Pentru ca întreaga energie acustică să fie dirijată în camera de tratare, emițătorul ultrasonic se plasează obișnuit în focarul unei oglinzi sferice sau parabolice.

În urma experiențelor efectuate de Hidermann cu privire la influența intensității asupra precipitării particulelor solide din fumul de țigară, prin iradierea cu ultrasunete timp de 5 secunde, au fost obținute următoarele date:

Amplitudinea vibrațiilor [μ]	Raportul maselor m/m_0
0	1
9	2,1
18	8,7
36	13,6
54	200

unde m și m_0 reprezintă masa particulei medii finale aglomerate și respectiv masa particulei medii inițiale.

b) În ceea ce privește frecvența, rezultatele cele mai bune au fost obținute prin utilizarea de unde acustice avînd frecvențe destul de joase, cuprinse între 5 și 25 kHz. În general, cu cît particulele în suspensie au dimensiuni mai mari cu atît este mai indicat a se folosi frecvențe mai joase. Pentru ca sirenele să nu producă sunete supărătoare pentru organul auditiv al omului se lucrează în special peste limita superioară a frecvenței audibile, în jur de 16 kHz. Acest lucru este posibil în prezent cînd sirenele statice și dinamice permit să fie produse sunete și de frecvențe mai ridicate, intrînd în domeniul ultrasonic.

Pe lîngă frecvență, un alt factor important îl joacă spectrul acustic produs de sirenă. Într-un aerosol existînd vrînd nevrînd particule de dimensiuni diferite, rezultă că prin utilizarea unei frecvențe unice a ultrasunetului nu vom putea pune în mișcare toate categoriile de particule. Astfel, dacă frecvența este ridicată, vor putea fi puse în vibrație doar particule foarte fine, în timp ce particulele mai mari nu sînt cîtuși de puțin influențate. Aceasta implică existența unui spectru mai larg de frecvențe, care să permită punerea în vibrație a unui număr cît mai mare de particule, căci numai în acest mod posibilitatea de ciocnire devine mai mare și deci aglomerarea particulelor mai accentuată. În plus, trebuie menționat că procesul de aglomerare neproducîndu-se instantaneu, particulele mai mari, generate în urma ciocnirilor, trebuie puse și ele în vibrație, pentru a se favoriza mai departe și ciocnirea acestora cu alte particule. Deci este indicat ca sirena să producă un sunet de bază avînd o frecvență mai scăzută și o serie de armonici, destul de puternice.

c) Durata tratamentului ultrasonic sau persistența aerosolului în cîmpul acustic joacă de asemenea un rol important. Mărind această durată, desigur se mărește probabilitatea ciocnirii între particule. Există totuși o limită care nu trebuie depășită, deoarece dincolo de această limită superioară nu se mai produce o creștere apreciabilă a gradului de aglomerare. Din practică s-a contatat că atunci cînd cîmpul acustic

este destul de intens și frecvența este judicios aleasă, durata expunerii gazului în suspensie de praf în câmpul ultrasonic este de câteva secunde, în general 4—5 s. Această mărime va determina pe de o parte, mărimea camerei de tratare și pe de altă parte viteza curentului de gaz cu particule în suspensie.

Pe lângă durata expunerii o importanță mare o are și sensul curentului de gaz față de sensul de propagare a undelor acustice directe. Se obține o eficacitate mai mare a procesului atunci când sensurile sînt contrare, curentul de gaz fiind dirijat spre sursa sonoră. Aceasta se datorește faptului că în cazul unui contracurent, particulele mai fine care se depun mai greu, sînt expuse un timp mai îndelungat acțiunii ultrasunetului și pe măsură ce sînt antrenate mai departe de gazul în mișcare intră în zona de intensitate tot mai mare a câmpului acustic, fiind din ce în ce mai apropiate de sursa sonoră.

Ținînd seama de durata necesară expunerii și de faptul că o viteză prea mare a curentului de gaz ar anihila în parte acțiunea de aglomerare a particulelor, o atenție deosebită trebuie acordată și acestei viteze. În general ea este de ordinul a 3—4 m/s. Dacă viteza ar depăși 10 m/s particulele ar lovi peretele instalației și ar fi din nou antrenate de curentul de gaz sub forma unui praf fin.

d) Procesul de aglomerare al particulelor fiind bazat pe ciocnirile dintre particule, rezultă că probabilitatea producerii acestor ciocniri se mărește atunci când particulele cuprinse într-un volum determinat este mai mare. Așa dar, cu cît concentrația aerosolului este mai mare, cu atît și eficacitatea procesului se mărește. Practica industrială a arătat că pentru a se obține un rezultat favorabil este necesară o concentrație minimă de 1—2 g/m³, în cazul cînd avem de-a face cu particule de dimensiuni diferite cuprinse între 1—10 μ . O concentrație în jurul de 5 g/m³ reprezintă o condiție optimă.

De multe ori în caz real nu dispunem de asemenea concentrații. Pentru a se ajunge cu aerosolul la o concentrație apropiată de cea indicată ca optimă, se adaugă în mediul gazos ultrasonat o ceață formată din particule fine de apă sau ulei. Bineînțeles acest procedeu de mărire a concentrației poate fi aplicat numai în anumite cazuri (negru de fum, particule de acid sulfuric) însă nu poate fi utilizat la depunerea prafului de ciment. Experiențele au arătat că prin adaosul de particule în scopul măririi concentrației s-a putut trece de la un randament de 10% la un randament de 70%, în cazul precipitării negrului de fum.

Nu este indicat a avea concentrații prea mari, în general superioare valorii de 15 g/m³, deoarece în acest caz există o absorbție mărită și ca

o consecință, o pierdere mare a energiei acustice utilizate. Această pierdere accentuată de energie face dificilă stabilirea regimului de unde staționare în camera de tratare.

În prezent metoda de aglomerare și depunere a particulelor cu ajutorul ultrasunetelor a depășit faza experimentală de laborator și se aplică pe cale industrială, construindu-se instalațiile adecvate. O asemenea instalație este formată dintr-un recipient (cameră de tratare), prin care circulă aerul cu particule în suspensie, unde se produce câmpul ultrasonic cu ajutorul unui emițător de ultrasunete (o sirenă statică sau dinamică), montat la un capăt al recipientului (fig. 5.14).

Lungimea camerei de tratare trebuie să fie de un număr întreg de ori mai mare ca lungimea de undă a ultrasunetului, pentru a se produce în interior rezonanța. Această lungime se poate obține prin varierea poziției peretelui inferior al camerei de tratare. Dacă însă dimensiunile recipientului sînt mari în raport cu lungimea de undă, această condiție nu este absolut necesar să fie îndeplinită.

Pentru a fi reduse cît mai mult pierderile de energie în interior, este indicat ca orificiile de intrare și de ieșire a aerului din camera de tratare să fie plasate în dreptul punctelor nodale de presiune. Cu toate că se poate folosi separarea datorită căderii libere a particulelor, totuși pentru o accelerare a procesului de depunere a particulelor în camera de tratare se pot folosi diferite sisteme ca: barbotajul, centrifugarea sau simpla filtrare. Poate fi întrevăzută o combinaie a diferitelor moduri de captare. În unele cazuri se utilizează o pulverizare de apă, atunci cînd particulele sînt prea uscate, acestea bineînțeles în cazurile în care natura particulelor o permite. De

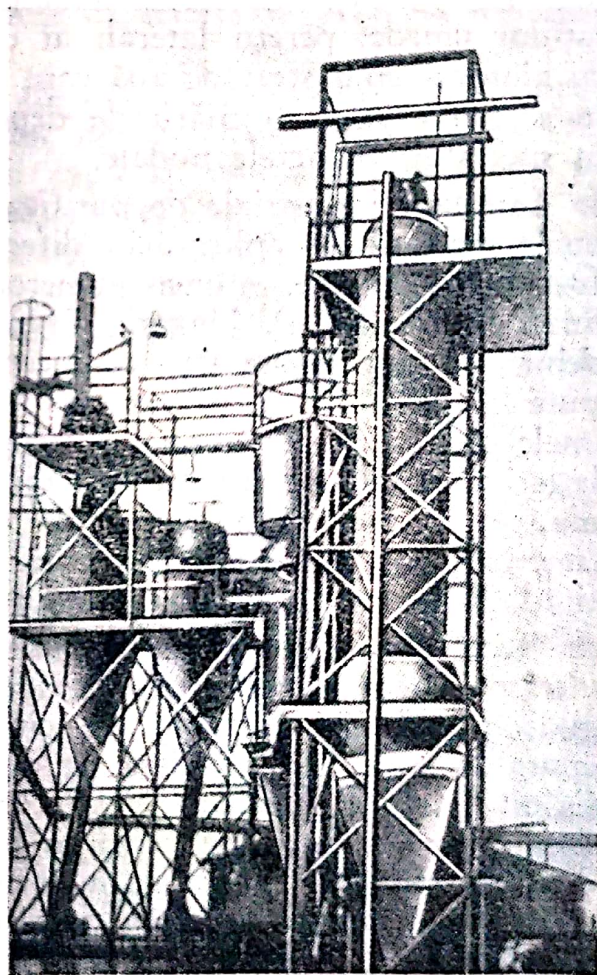


Fig. 5.14. Instalație industrială pentru aglomerarea și depunerea particulelor în suspensie cu ajutorul ultrasunetelor.

exemplu în cazul recuperării particulelor de ciment, acest lucru nu este posibil.

La instalațiile moderne de purificarea gazelor cu ajutorul ultrasunetelor se caută ca ambele faze ale procesului (aglomerarea și depunerea) să fie făcute într-o aceeași cameră. În felul acesta se elimină unul din dezavantajele instalațiilor cu două camere separate, cu una pentru tratarea ultrasonică și alta pentru depunerea particulelor, dezavantaj care constă în faptul că traiectul particulelor aglomerate fiind destul de lung se producea frecvent o fărîmîtare a acestor aglomerații și deci o dificultate în depunerea particulelor.

Platoul plasat la partea inferioară a instalațiilor moderne, pe care se depun particulele precipitate, poate fi curățat în permanență sau în mod intermitent cu ajutorul unui jet de aer suplimentar. În cazul instalațiilor umede, pereții laterali ai camerei sînt spălați în mod continuu cu ajutorul unui strat de apă care se prelinge de-a lungul acestor pereți, în scopul evitării formării de depozite de particule în anumite locuri, în special în punctele nodale.

Instalații industriale de purificarea gazelor cu ajutorul ultrasunetelor au început să fie aplicate în diferite industrii încă din anul 1948. Au fost construite de atunci numeroase asemenea instalații în U.R.S.S., R.P. Polonă, R.P. Ungară, Franța, S.U.A. etc., instalații lucrînd cu debite de gaz foarte variate începînd de la aproximativ 3000 m³/oră pînă la circa 120 000 m³/oră. În cazul precipitării negrului de fum, după unele date se poate obține o recuperare de pînă la 96%. Cu o instalație industrială pentru precipitarea oxidului de zinc, construită în Polonia, s-a obținut un randament de 97%. Este de menționat că epuratorul funcționează după principiul curentului antiparalel, fasciculul ultrasonic fiind dirijat în sens contrar sensului de circulație a gazului.

Rezultatele cele mai importante obținute prin folosirea procedeului ultrasonic sînt cele din domeniul depunerii aerosolilor lichizi (cețuri de gudron, de acizi etc.). Putem cita în această privință instalația unui epurator sonic care tratează pe oră cca. 40 000 m³ gaz, la 50°C, conținînd particule în suspensie de acid sulfuric (concentrație 1 g/m³, dimensiunile particulelor sînt cuprinse între 0,5—5 μ). Utilizînd o frecvență de 2,25 kHz, un nivel de intensitate acustică de 150 dB și aplicînd tratamentul asupra gazului timp de 4 s, s-a obținut o depunere de cca. 90% din cantitatea de acid pe care o conținea curentul de gaz.

În urma cercetărilor întreprinse de R. M. Boucher, s-a constatat că prin aplicarea metodei sonice, eficacitatea precipitării aerosolilor poate crește cu 50—55% față de metodele de precipitare prin folosirea cicloa-

nelor. Aceste creșteri ale eficienței s-au obținut prin folosirea sunetelor de frecvență de 11 kHz și a unui nivel de intensitate acustică de 150 dB.

Procedeul de depunerea particulelor cu ajutorul ultrasunetelor, prezintă față de alte procedee, o serie de avantaje evidente. În primul rând, pot fi purificate gaze aflate la temperaturi ridicate, nemaî fiind necesare camere de răcire introduse în circuit înainte de locul efectuării purificării. Au fost create instalații la care gazele, care trebuiau epurate, aveau temperaturi de 800°C.

În al doilea rând, procedeul asigură o eficacitate destul de largă în sensul că, prin alegerea adecvată a frecvențelor se pot realiza depuneri de particule avînd dimensiuni variate, de la cîțiva microni pînă la cîteva zecimi de microni.

În al treilea rând, procedeul ultrasonic prezintă o mare siguranță în exploatare, putîndu-se purifica și gazele caracterizate printr-o inflamabilitate pronunțată.

În fine, și din punct de vedere economic, procedeul ultrasonic, chiar dacă nu este net superior altor procedee similare, este totuși comparabil. Filtrele electrostatice implică investiții capitale, mai mari decît cele pe care le implică instalațiile de epurare sonice, care au și avantajul că pe timpul exploatării consumul de energie electrică este relativ redus. După datele indicate de diferiți autori, pentru alimentarea sirenelor ar fi necesari 2—5 kW pentru 1000 m³/oră de gaz tratat. După unii autori americani, consumurile ar fi și mai reduse, nedepășind 1,2—3 kW în aceleași condiții de funcționare.

Cum în unele instalații se folosesc unde acustice de frecvență în domeniul audibil, în aceste cazuri unul din dezavantajele procedurii constă în faptul că sunetul produs de sirenă constituie un factor nociv pentru lucrătorii care deservește instalația. Pentru a se reduce cît mai mult cu putință nivelul zgomotului care se transmite în exterior din camera de tratare, se căptușesc pereții camerei de tratare cu materiale speciale, care să dea atenuarea maximă posibilă a zgomotului.

În general cu instalațiile de precipitare cu ajutorul ultrasunetelor se obțin rezultate satisfăcătoare, randamentele atîngînd valori apreciable, în numeroase cazuri peste 90%. Pentru obținerea unor asemenea randamente este necesar a se cunoaște cît mai bine mecanismul de aglomerație și precipitare cu ajutorul ultrasunetelor și a se ține seama de parametrii care influențează eficacitatea procesului.

Depunerea particulelor în suspensie în lichide. Extinzînd procedeul de precipitare cu ultrasunete a particulelor aflate în suspensie în medii gazoase și la particulele solide sau lichide aflate în suspensie în medii

lichide pot fi obținute rezultate favorabile și în acest ultim caz. Aglomerarea și separarea, urmate apoi de depunere, se pot produce în orice lichid unde sînt asigurate condițiile formării de unde staționare, însă acest efect este aici mascat de acțiunea dispersivă datorită cavitației, care se produce la trecerea prin lichid a undelor acustice intense.

De aceea, pentru a putea fi obținută și în lichide precipitarea particulelor în suspensie și pentru a se evita producerea fenomenului contrar, este necesar a doza astfel energia undelor acustice pentru a se împiedica apariția cavitației, cu alte cuvinte, trebuie utilizat un cîmp ultrasonic relativ slab, intensitatea ultrasunetelor trebuind a fi mai mică decît valoarea limită care dă naștere cavitației. Astfel, dacă se folosesc ultrasunete avînd frecvențe de 20 kHz, intensitatea acustică nu trebuie să depășească valoarea de aproximativ 2 W/cm^2 , considerată necesară pentru producerea cavitației.

Datorită tocmai condițiilor limitatoare care se pun la folosirea ultrasunetelor în depunerea particulelor aflate în suspensie în lichide, procedeul ultrasonic se combină cu sistemul obișnuit de purificare cu ajutorul filtrelor. Se știe că prin utilizarea excesivă a filtrelor, particulele oprite de peretele filtrant formează depuneri, care atunci cînd devin mari, acoperă filtrul împiedicîndu-l să mai lucreze. De aceea filtrarea trebuie întreruptă, trebuie curățat filtrul și refăcută instalația. Aceasta constituie unul din dezavantajele procedeei de purificare a lichidului cu ajutorul filtrelor, deoarece exploatarea nu mai este continuă, din timp în timp trebuind a fi întreruptă.

Un alt dezavantaj al acestui procedeu îl constituie și faptul că în majoritatea cazurilor filtrele uzuale nu pot reține particule solide avînd dimensiuni mai mici de 1μ .

Dezavantajele semnalate mai sus pot fi înlăturate dacă se combină între ele cele două procedee de purificare: ultrasonic și cu ajutorul filtrelor, în care caz filtrului însuși i se aplică vibrații ultrasonice. Ca urmare a mișcării vibratorii a filtrului, pe peretele acestuia nu se mai depun resturi și în consecință nu se mai produce o murdărire și o astupare a filtrului. Instalația de filtrare cu ultrasunete poate așa dar lucra timp îndelungat, fără a fi necesară demontarea și curățirea sau înlocuirea filtrului. În plus, prin utilizarea ultrasunetelor se înlătură nevoia folosirii unor substanțe de filtrare suplimentare, care murdăresc rezidul și îngreunează folosirea lui în scopuri utile.

Pentru ca filtrul să poată fi pus în vibrație, instalația este prevăzută cu un emițător ultraacustic, de regulă magnetostrictiv sau electromagnetic, lucrînd pe o frecvență în jur de 12 kHz. Emițătorul se găsește

așezat la partea superioară a bazinului de filtrare și este închis într-un recipient în care circulă apa, în vederea răcirii emițătorului (fig. 5.15). Legătura dintre transductor și filtru se realizează prin intermediul unei bare, care poate avea secțiunea constantă sau variabilă, obișnuit exponențială, constituind un transformator de viteză. În acest mod se realizează o amplificare a vibrațiilor, amplitudinile cu care vibrează filtrul fiind mai mari decât cele ale barei sau membranei transductorului. Randamentul instalației este cu atât mai bun cu cât filtrul vibrează ca un piston rigid; în consecință el trebuie astfel realizat încât să nu se înconvoaie pe timpul mișcării vibratorii la care este supus.

Lichidul conținând particule în suspensie care au o densitate mai mare decât cea a lichidului este introdus în bazin printr-o țeavă racordată la partea inferioară a bazinului, iar ieșirea lichidului purificat se face printr-o țeavă situată la partea de sus a bazinului. În felul acesta lichidul este obligat a traversa peretele filtrului. Particulele solide care nu au putut trece prin filtru, se aglomerează și datorită vibrării peretelui nu se mai pot fixa de acesta, depunându-se pe fundul bazinului, care este prevăzut cu pereți înclinați. Evacuarea particulelor se face printr-un orificiu de la baza bazinului.

Dacă din contra, particulele în suspensie au o densitate mai mică decât cea a lichidului care le transportă, acesta este introdus în bazin prin partea superioară. Particulele sînt reținute în acest caz și recuperate la partea de sus a bazinului.

5.2.6. Formarea emulsiilor cu ajutorul ultrasunetelor. Posibilitatea de dispersare a particulelor unui lichid în alt lichid cu ajutorul ultrasunetelor a permis să se elaboreze o metodă ultrasonică pentru prepararea emulsiilor. Prin folosirea unei asemenea metode se poate obține o emulsie stabilă, cu o dispersie fină, caracteristici de o deosebită importanță în multe ramuri industriale.

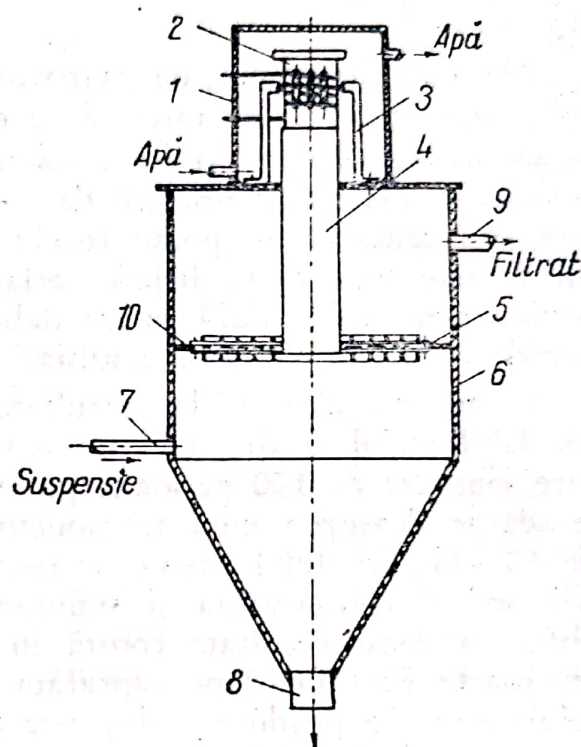


Fig. 5.15. Instalație cu ultrasunete pentru filtrare.

În general, prin folosirea ultrasunetelor de intensități mari se obțin emulsii mult mai stabile și mai omogene decât prin utilizarea metodelor mecanice obișnuite. Astfel, o emulsie formată cu ajutorul ultrasunetelor nu s-a stratificat nici după 216 ore de depozitare, în timp ce o aceeași emulsie preparată prin metodele obișnuite se stratifică după 5 ore de depozitare.

Metoda ultrasonică de preparare a emulsiilor dă posibilitatea efectuării operației într-un interval de timp mai scurt, și procesul de amestec se accelerează dacă se aplică presiuni exterioare de la 100 la 1500 mmHg și dacă se mărește suprafața de contact dintre stratul de ulei și cel de apă. Cu toate că se poate forma emulsia în mod simplu iradiind cu ultrasunete cele două lichide aflate într-un recipient, totuși acțiunea devine mai rapidă dacă în prealabil s-a produs amestecarea celor două lichide care vor constitui emulsia.

O metodă care a dat rezultate bune este aceea de a amesteca în prealabil uleiul și apa, făcându-le să treacă pe deasupra unei membrane care vibrează cu 100 perioade pe secundă. Apoi amestecul astfel realizat se scurge deasupra unui transductor magnetostrictiv având o frecvență de 10 kHz. În felul acesta, se reduce mult timpul de formare a emulsiei, având concentrația și stabilitatea dorită. Un alt mijloc de a se obține aceleași rezultate constă în pulverizarea uleiului sub formă de jet foarte fin, direct pe suprafața transductorului cufundat în apă; în felul acesta se produce o dispersie a uleiului și amestecul se poate efectua în condiții mai bune.

Un alt avantaj pe care-l prezintă metoda ultrasonică de preparare a emulsiilor este economisirea stabilizatorilor. Se știe că pentru obținerea unor emulsii stabile cu ajutorul metodelor mecanice obișnuite, este nevoie să se folosească o mare cantitate de stabilizatori. A. G. Lifșiț arată că utilizând o instalație mecanică obișnuită s-a preparat o emulsie de parafină și apă într-un interval de 2—3 ore și cu toate că s-a introdus pentru 100 gr. parafină, 150 gr. stabilizator (săpun de stearină), totuși emulsia s-a stratificat destul de repede. O aceeași emulsie preparată cu ajutorul ultrasunetelor s-a efectuat în 10—20 min. și n-a necesitat decât un sfert din cantitatea de stabilizator utilizată în cazul precedent. Emulsia a fost de această dată mai stabilă.

Economia de timp și de stabilizatori realizată face ca prețul de cost al unei emulsii preparate cu ajutorul metodei ultrasonice să fie mai redus decât prețul de cost al unei emulsii realizate cu instalațiile obișnuite. Un calcul economic efectuat de O. Taraba arată că prin folosirea emițătoarelor magnetostrictive, prețul de cost s-a redus de 2—4 ori în

raport cu felul emulsiei, iar prin folosirea de fluier cu lichid costul emulsiei s-a redus de cîteva zeci de ori.

Cu toate avantajele evidente pe care le are metoda ultrașonică de prepararea emulsiilor, totuși aplicarea în industrie a acestei metode a întârziat, acest lucru datorîndu-se dificultăților ivite la construirea unor instalații de capacitate mare. Aceste dificultăți au putut fi înlăturate odată cu folosirea emițătoarelor ultrasonice cu jet de lichid care permit să fie generate ultrasunete de frecvență și intensități necesare, energia ultrașonică putînd fi concentrată într-un volum mic. Dar și în acest caz există o limitare a domeniului de aplicare, asemenea emițătoare neputînd fi utilizate decît pentru componente ale emulsiei cu o vîscozitate relativ scăzută. Se poate totuși reduce prin încălzire prealabilă vîscozitatea unuia dintre lichide. În felul acesta, printr-o încălzire a bitumului la o temperatură cuprinsă între 50° și 100°C, s-a reușit să se prepare cu ajutorul ultrasunetelor o emulsie de bitum în apă. Studiile efectuate cu privire la procesul de formare a emulsiilor sub acțiunea ultrasunetelor au putut stabili o serie de parametri care influențează acest proces. Unii parametri depind de cîmpul acustic (intensitatea și frecvența ultrasunetelor, caracterul cîmpului acustic, durata iradierii cu ultrasunete). Alți parametri se referă la condițiile fizice în care se efectuează operația (temperatura și presiunea hidrostatică) și în fine alți parametri țin seama de natura componentelor emulsiei și a substanței stabilizatoare întrebuintate. În cele ce urmează vor fi examinați acești parametri prin prisma cercetărilor și rezultatelor obținute pînă în prezent.

a) *Intensitatea ultrasunetului.* Cercetări cu privire la cinetica procesului de emulsionare cu ajutorul ultrasunetului au arătat că în același sistem de lichide se poate observa o formare selectivă a emulsiei, putîndu-se produce fie o emulsie de tip direct (ulei/apă), fie o emulsie inversă (apă/ulei). Prepararea unei emulsii în general implică întrebuintarea de ultrasunete de o anumită intensitate, a cărei valoare trebuie să depășească o intensitate limită, diferită cu tipul emulsiei. Astfel pentru formarea unei emulsii de tipul ulei/apă intensitatea acustică limită este mai redusă decît cea necesară pentru formarea tipului de emulsii apă/ulei. Valoarea intensității limite depinde de o serie de cauze, printre care un rol predominant îl joacă starea fizică a suprafețelor de separare (tensiunea superficială, modul cum lichidele udă vasul etc.), precum și natura componentelor emulsiei. Astfel, în cazul formării emulsiilor dibutil fosfat-apă, toluol-apă, tetraclorură de carbon-apă, intensitățile acustice limită sînt respectiv 0,5 W/cm², 5 W/cm² și 8 W/cm², valori măsurate în dreptul suprafeței emițătorului.

O dată cu creșterea intensității acustice peste valoarea limită are loc o intensificare a formării fazei disperse și viteza de formare a emulsiei crește. În fig. 5.16 este indicată după S. A. Nedouji variația vitezei procesului în funcție de intensitatea ultrasunetelor. În ordonată sînt

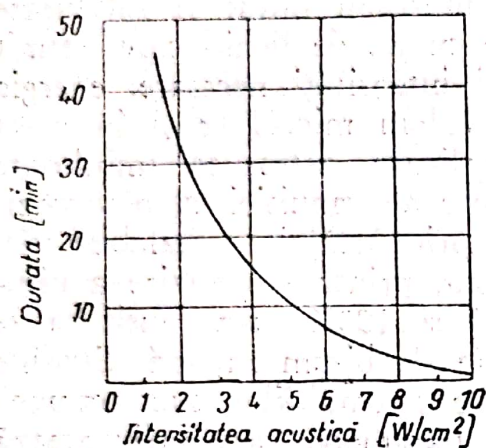


Fig. 5.16. Variația cu intensitatea acustică a duratei de preparare a emulsiei.

indicate valori ale duratei de formare a emulsiei, în minute, iar în abscisă valori ale intensității acustice, în W/cm^2 . În intervalul de intensități considerat pînă la $10 W/cm^2$, se poate constata o dependență liniară între viteza de formare a emulsiei și intensitatea acustică.

Folosirea emulgatorilor permite să se obțină la aceleași intensități emulsii cu concentrații pînă la 75%. Astfel, fără a se utiliza emulgatori, s-a preparat o emulsie de mercur în apă cu o concentrație de mercur de 0,078—0,11‰. Folosindu-se ca emulgatori citratul de amoniu, același tip de emulsie a fost obținută cu o concentrație pînă la 0,44‰.

b) Frecvența ultrasunetului influențează procesul de emulsionare în sensul că ea poate determina tipul de emulsie produsă și poate modifica în special cantitatea și mai puțin calitatea emulsiei. Studiindu-se formarea emulsiilor într-un interval de frecvență cuprins între 25 și 2880 kHz s-a constatat că la frecvența de 25 kHz se obțin în același timp ambele tipuri de emulsii (ulei/apă și apă/ulei). La frecvențe mai mari, de exemplu 187 și 320 kHz, s-a observat formarea numai a unui singur tip de emulsie ulei/apă, chiar atunci cînd a fost utilizat un emulgator.

În general ultrasunetele de frecvență înalte s-au dovedit a fi mai puțin eficace decît cele de frecvență joasă. Astfel în cazul preparării unei emulsii litiu/ulei, s-a constatat că prin aplicarea ultrasunetelor cu o frecvență de 25 kHz au fost obținute rezultate cantitative superioare decît atunci cînd au fost folosite ultrasunete avînd frecvența de 700 kHz cu toate că din punct de vedere al calității nu au putut fi observate diferențe sensibile. Se pare totuși că ultrasunetele de frecvență mai ridicată produc emulsii cu dimensiuni ale particulelor disperse mai mici.

Unii autori recomandă pentru prepararea emulsiilor folosirea de ultrasunete avînd frecvențe cuprinse în intervalul de 25—400 kHz, iar

În cazul existenței unor emițătoare cu posibilități de focalizare a energiei ultrasonice, domeniul de frecvențe este 400—500 kHz. Valoarea frecvenței necesară a fi aleasă, mai depinde și de vâscozitatea uleiurilor care intră în compoziția emulsiilor. Dacă vâscozitatea este mai mare trebuie să se folosească ultrasunete de frecvențe coborâte. O corelare între gradul de vâscozitate și frecvența ultrasunetului nu s-a putut face cu precizie din cauza greutăților în obținerea unei game largi de grade de vâscozitate pentru un același tip de ulei.

Faptul că o emulsie se realizează mai ușor cu unde ultrasonice de frecvență joasă decât cu cele de frecvență înaltă, precum și necesitatea de a se folosi ultrasunete ale căror intensități trebuie să depășească o valoare limită a condus pe mulți cercetători să considere că acest proces este datorit, pe lângă, efectului undelor capilare de suprafață, și fenomenului de cavitație acustică. În susținerea acestei ipoteze vine și constatarea că nu este posibilă producerea unei emulsii din lichide complet degazate, care după cum se știe elimină posibilitatea apariției cavitației acustice. În schimb dizolvarea de gaze, fie active, fie inerte, în lichide, ușurează formarea emulsiilor. Experiența a dovedit însă, că fenomenul de cavitație nu poate fi cauza producerii emulsiei de mercur în apă sau în general al emulsiilor constituite dintr-un metal cu punct de topire coborât și un lichid. În cazul unor asemenea emulsii procesul se produce ca urmare a acțiunii undelor capilare de suprafață.

c) Caracterul câmpului acustic influențează procesul de emulsionare, în sensul că prin aplicarea unor unde ultrasonice progresive se mărește eficacitatea procesului, față de aplicarea unor unde staționare. Aceasta se explică prin faptul că într-un câmp de unde staționare predomină un proces contrar dispersării, anume coagularea. Astfel dacă într-un câmp de unde progresive s-a obținut o emulsie de tipul apă/ulei cu o concentrație de 30%, într-un câmp de unde staționare, emulsia formată nu avea o concentrație mai mare de 10%. În plus, se pare că frecvența limită a ultrasunetului, la care se mai poate obține o emulsie, este mai ridicată în cazul folosirii undelor progresive decât într-un câmp de unde staționare.

Cercetările întreprinse până în prezent arată că tipul de emulsie format nu depinde de caracterul câmpului acustic. Astfel, lucrându-se la o frecvență de 960 kHz a fost obținută o emulsie de tipul apă/ulei, atât prin folosirea de unde progresive, cât și prin folosirea de unde staționare. Ceea ce a variat în cele două cazuri a fost, după cum s-a arătat, concentrația emulsiei.

d) Procesul de emulsionare începe să aibe loc, după un oarecare interval de timp de la aplicarea ultrasunetelor, și acest interval de timp este

mai îndelungat în cazul unei emulsii de tipul apă/ulei decât în cazul unei emulsii de tipul ulei/apă, iar momentul formării emulsiei coincide cu momentul în care se atinge o anumită concentrație a emulsiei de tipul ulei/apă.

Durata de aplicare a ultrasunetelor influențează gradul de dispersie și omogenitatea emulsiei. Astfel, cum dimensiunea particulelor emulsiilor depinde în afară de intensitatea și frecvența ultrasunetului și de durata de ultrasonare rezultă că o emulsie fin dispersată se poate obține cu intensități mici și cu o durată de aplicare a ultrasunetelor mică, deoarece în aceste condiții coagularea este mai slabă. Dacă însă se prelungește timpul de ultrasonare are loc o mărire a dimensiunilor particulelor datorită faptului că în acest caz preponderent devine fenomenul de coagulare. Așadar, în cursul procesului de formare a unei emulsii au loc două fenomene contrare, unul de dispersare și altul de coagulare a particulelor, care în dezvoltarea lor la un moment dat ating un echilibru. De aici rezultă că există o anumită durată optimă de aplicare a câmpului ultrasonic, specifică fiecărui tip de emulsie.

e) Temperatura la care se găsesc componentele unei emulsii are mare influență asupra procesului de formare al unei emulsii. Creșterea temperaturii până la aproximativ 35°C favorizează formarea fazei disperse datorită micșorării vîscozității și a tensiunii superficiale. Ridicarea în continuare a temperaturii până la aproximativ 50°C nu contribuie la îmbunătățirea emulsiei, în timp ce o temperatură superioară acestei valori produce o scădere a calității emulsiei. Această particularitate s-ar datora dependenței de temperatură a fenomenului de cavitație, care ar sta la baza formării emulsiei. Cum datorită absorbției energiei acustice care are loc în mediul supus iradierii, se produce o creștere a temperaturii aceluia mediu, rezultă că o durată mai îndelungată de aplicare a câmpului acustic contribuie la mărirea excesivă a temperaturii lichidelor, ceea ce duce la micșorarea eficacității procesului de emulsionare. Cunoșcînd că absorbția acustică diferă de la un mediu la altul, rezultă o diferență între temperaturile celor două faze lichide la un moment dat. Dacă această diferență este prea mare se produce o întrerupere a procesului de emulsionare.

Există o temperatură optimă caracteristică fiecărei perechi de componente ale emulsiei care este legată de valoarea temperaturii la care fenomenul de cavitație se produce cu maxim de intensitate. Astfel, în cazul apei această valoare este egală cu 50°C iar pentru petrol de 25°C . În cazul emulsiilor la care o componentă o constituie mercurul sau un metal cu o temperatură de topire joasă cele mai bune rezultate au fost obținute la temperaturi egale cu temperatura de topire a componentei care trece

în stare dispersă. În unele cazuri nu este necesară o încălzire suplimentară a componentelor, fiind suficientă ridicarea temperaturii datorită absorbției acustice produsă în urma ultrasonării.

f) Un alt factor fizic de care depinde formarea emulsiilor de tipul apă/ulei este presiunea hidrostatică, existînd o anumită presiune optimă, care favorizează producerea procesului de emulsionare. Astfel în cazul emulsiei toluol/apă, maximumul de concentrație s-a obținut la o presiune de 1 500 mm Hg. Spre deosebire de formarea emulsiilor de tipul apă/ulei, procesul de formare al emulsiilor de mercur este independent de presiunea hidrostatică, putînd avea loc atît în vid cît și la presiuni mari.

g) Este știut că atunci cînd se aplică metodele mecanice obișnuite pentru emulsionare, pentru facilitarea producerii procesului și pentru mărirea stabilității emulsiei se folosesc substanțe tensioactive și stabilizatori. Utilizarea și în cazul metodei ultrasonice a unor substanțe tensioactive face ca dispersarea să fie ușurată ca urmare a scăderii tensiunii dintre cele două lichide care se amestecă și în felul acesta pot fi obținute emulsii mai concentrate cu ajutorul ultrasunetelor de intensități mai mici. Cu toate acestea operația de emulsionare poate fi efectuată obținîndu-se emulsii suficient de concentrate și fără introducerea de substanțe tensioactive. Această posibilitate are o deosebită importanță în cazurile în care prezența emulgatorului este nedorită și chiar dăunătoare stabilității emulsiei. Astfel au fost obținute fără a se recurge la substanțe tensioactive emulsii de grăsimi în apă cu lapte (20%) stabile și bine dispersate. A. Audouin și G. Levavasseur citează că au obținut fără emulgator o emulsie de tipul apă/ulei care s-a păstrat aproximativ o săptămînă, iar emulsia de tipul ulei/apă s-a păstrat de la o lună la cîteva luni.

Dacă procesul de emulsionare necesită totuși folosirea unor substanțe tensioactive, trebuie acordată mare atenție la alegerea acestora, cunoscînd că unele substanțe pot să schimbe în mod pronunțat proprietățile sub acțiunea undelor ultrasonice. În majoritatea cazurilor are loc un proces de depolimerizare, care micșorează vîscozitatea substanței.

Instalațiile cu ultrasunete pentru prepararea emulsiilor, numite și omogenizatoare, pot fi clasificate în patru grupe, în raport cu metoda care are scopul producerii emulsiei și anume:

- emulsionare progresivă;
- emulsionare instantanee;
- emulsionare cu o singură trecere;
- emulsionare cu treceri multiple.

În cazul instalațiilor cu emulsionare progresivă (fig. 5.17, a), vasul A conține faza dispersă, iar vasul B conține faza continuă a emulsiei.

Uleiul trece prin intermediul unei valve cu trei căi în fluierul ultrasonic, prin care trece și apa, iar emulsie formată este introdusă în vasul *B*. Metoda este folosită la prepararea produselor cosmetice și a sucurilor de fructe și de pătlăgele roșii.

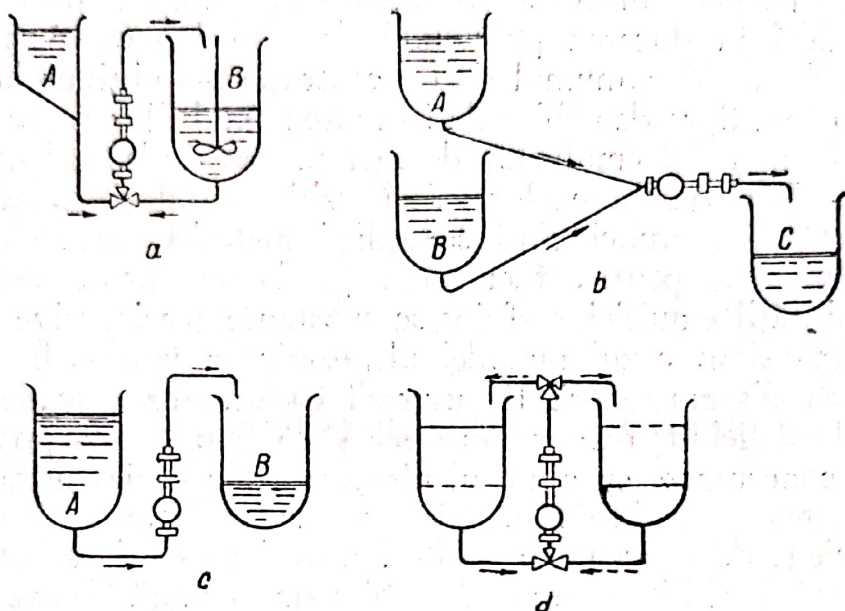


Fig. 5.17. Metode de preparare a emulsiilor prin folosirea unui emițător ultrasonic cu jet de lichid:

a — emulsionare progresivă; *b* — emulsionare instantanee; *c* — emulsionare cu o singură trecere; *d* — emulsionare cu treceri multiple.

În cazul instalațiilor cu emulsionare instantanee (fig. 5.17, *b*) uleiul și apa se găsesc depozitate în vase separate, ele trecând simultan prin generatorul ultrasonic cu jet. Emulsia formată este colectată în vasul *C*. Metoda este utilizată în special la prepararea maionezei și a cremelor.

La instalațiile la care emulsionarea se produce în urma unei singure treceri prin fluierul ultrasonic (fig. 5.17, *c*), cele două lichide care urmează a se amesteca se găsesc depozitate în vasul *A*. În urma trecerii lor prin generatorul de ultrasunete, se realizează emulsia care este colectată în vasul *B*. Asemenea instalații sînt folosite pe scară largă la prepararea adezivilor, a gelatinelor, a margarinei, a supelor, a vopselelor pentru industria textilă etc.

Spre deosebire de instalațiile anterioare, instalațiile cu treceri multiple (fig. 5.17 *d*) asigură producerea emulsiei prin treceri succesive ale amestecului prin fluierul ultrasonic. Aceasta se realizează cu ajutorul unui dispozitiv cu două valve. Au aceleași întrebuintări ca și instalațiile de emulsionare cu o singură trecere.

În mod analog dispersării particulelor lichide într-un alt lichid, pot fi obținute cu ajutorul ultrasunetelor dispersarea unor particule solide într-un mediu lichid. Intensitatea acustică limită este în acest caz superioară intensității limită necesară pentru formarea unei emulsii. Grație acestei acțiuni au putut fi obținute în lichide dispersii de particule metalice ca: bismut, cupru, plumb, argint.

Cercetările experimentale au arătat că nu este necesar ca substanța de dispersat să fie de dimensiuni foarte reduse, deoarece sub acțiunea ultrasunetelor particulele în suspensie pot fi fărâmițate ajungându-se să se obțină suspensii cu particule foarte fine. Astfel în urma aplicării ultrasunetelor, particulele considerate sferice cu diametrul de 10 și 15 microni au ajuns la un diametru de 3 microni.

Această metodă se aplică în industrie în multe situații. Astfel pot fi dezagregate celulele plantelor pentru a se elibera conținutul lor. În felul acesta a putut fi eliberat conținutul amar al hameiului cu un randament superior celui corespunzător mijloacelor mecanice obișnuite. Particulele amare din plantă sînt complet dispersate în bere, obținându-se o mărire a randamentului extracției de la 65 la 85%, realizându-se în același timp și economii însemnate.

Ultrasonarea unor legume are ca efect ruperea pereților celulelor, punându-se în libertate conținutul celular. În felul acesta pot fi realizate dispersii fine de legume și fructe, a căror utilizare este în special recomandabilă la prepararea produselor dietetice și a celor destinate copiilor. Aceeași acțiune de dezintegrare face să fie puse în libertate cantități mărite de enzime, obținându-se prin ultrasonarea fructelor randamente sporite de suc. În ce privește vitamina C, singura care interesează în cazul produselor din fructe și legume, pierderile înregistrate în urma iradierii cu ultrasunete nu au depășit 30% din valoarea inițială.

Metoda ultrasonică aplicată la extragerea colofoniului din osmol a făcut ca procesul să se efectueze de 4—5 ori mai repede decît în condițiile obișnuite. Această metodă se aplică cu bune rezultate și la eliminarea reziduurilor catalizatorilor din polietilenă. Purificarea polietilenei de amestecuri anorganice nedorite cu ajutorul ultrasunetelor, se poate realiza într-un procent de 70%—80%, efectuîndu-se într-un interval de timp mai scurt decît prin folosirea metodelor mecanice obișnuite, ceea ce reprezintă un mare avantaj în fabricarea acestui material sintetic.

Utilizarea ultrasunetelor pentru dispersie are în prezent aplicare și în industria lacurilor și a vopselelor. Ultrasunetele pulverizează fin pigmenții de coloranți și fiecare particulă este învelită într-o peliculă de lac. Procesul devine continuu și are o viteză de 10 ori mai mare decît viteza corespunzătoare proceselor produse cu metode obișnuite.

5.2.7. Acțiunea ultrasunetelor asupra polimerilor. Examinându-se influența pe care poate s-o aibă un câmp ultrasonic asupra unui polimer s-a găsit că ultrasunetele au posibilitatea de a rupe legăturile chimice ale unui lanț de molecule făcându-se să se micșoreze dimensiunile moleculelor. Se produce în felul acesta o depolimerizare. Cercetările au fost întreprinse în soluții de polistiren, de polimetil metacrilat, de cauciuc și gelatină, de agar și acid deoxiribonucleic, de nitroceluloză ș.a.

Aplicându-se un câmp de unde ultrasonice unei soluții de 5—10% gelatină în apă sau cauciuc în toluen, s-a observat că sub acțiunea ultrasunetelor greutatea moleculară scade, efect pus în evidență prin micșorarea vîscozității soluției. În unele cazuri după un timp de la încetarea acțiunii ultrasunetelor soluția revine la o vîscozitate apropiată de cea inițială, avîndu-se de a face cu o trecere reversibilă de la gel spre soluție și apoi de la soluție spre gel denumită tixotropie. În alte cazuri, însă, atunci cînd se iradiază cu ultrasunete un timp mai îndelungat soluții de nitroceluloză, acetat de polivinil și de polistiren, s-a constatat o reducere ireversibilă a vîscozității, polimerul nu mai revine la vîscozitatea sa inițială, nici chiar prin evaporarea soluției și nici printr-o nouă dizolvare a polimerului. Aceasta arată că s-a produs o scindare a structurii moleculare provocată de ruperea legăturilor de valență sub acțiunea ultrasunetelor, iar după încetarea acestei acțiuni legăturile nu mai pot fi restabilite.

În procesul de depolimerizare cu ajutorul ultrasunetelor un rol important îl are cavitația acustică, cunoscînd că într-un lichid complet degazat sau aflat sub presiune, depolimerizarea nu mai are loc. Se pare însă că fenomenul de cavitație nu este singura cauză care asigură depolimerizarea. La producerea acestui proces concură și acțiunea distructivă a forțelor de frecare ce iau naștere în lichid în urma iradierii cu ultrasunete. Moleculele lichidului, antrenate de ultrasunetele de frecvență și intensitate mare, capătă o viteză mărită de agitație. Datorită inerției, moleculele polimerilor nu pot urma mișcările lichidului produse la trecerea undei. În acest fel masa lichidului care oscilează trece prin împletiturile firelor moleculare. La suprafața de separație dintre polimeri și masa lichidului apar forțe de frecare care pot căpăta valori apreciabile care depășesc forța necesară ruperii legăturii dintre moleculele polimerului. Aceasta duce la distrugerea macromoleculei, deci la depolimerizare. Calculul mărimii forțelor de frecare și cercetările experimentale confirmă posibilitatea ruperii legăturilor în acest mod. Se impune însă o condiție și anume, existența unei anumite densități a macromoleculei și a unor molecule în formă de fire, la care suprafața de contact cu lichidul este mare, iar forțele necesare ruperii moleculelor sînt mici. În cazul moleculelor

scurte, mărimea forțelor de frecare care iau naștere în urma acțiunii ultrasunetului este insuficientă pentru a provoca ruptura legăturilor chimice.

Eficacitatea și viteza procesului de depolimerizare cu ajutorul ultrasunetelor depind de mai mulți factori, dintre care unii sînt legați de cîmpul ultrasonic aplicat (intensitatea, frecvența, durata iradierii), alții privesc soluția iradiată (natura solventului, concentrația soluției) și în fine alți parametri se referă la mediul în care are loc procesul (temperatura, presiunea hidrostatică).

a) Procesul de depolimerizare este cu atît mai eficient cu cît intensitatea ultrasunetului este mai mare, așa după cum se poate vedea din fig. 5.18. Viscositatea soluției de polisterol, în toluol scade rapid o dată cu creșterea intensității acustice, însă de la o anumită valoare a acestui parametru scăderea este mică. În consecință în cazul experienței se poate considera o valoare optimă a intensității acustice, egală aproximativ cu 10 W/cm^2 .

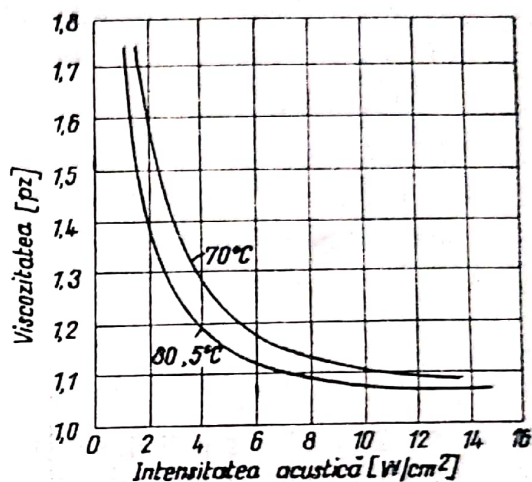


Fig. 5.18. Variația viscozității soluției cu intensitatea acustică.

b) Frecvența ultrasunetului pare să joace un rol secundar în procesul de depolimerizare, atîta timp cît ea nu depășește cîteva sute de kilohertzi. Schmidt, consideră că undele ultrasonice de frecvență înaltă au un efect mai mic decît cele de frecvență coborîță, la care fenomenul de cavitație este mai accentuat.

c) Depolimerizarea, pusă în evidență prin micșorarea vîscozității soluției sau a greutateii moleculare medii se produce după un interval de timp de acționare a ultrasunetelor. Mărindu-se durata iradierii, se constată că ultrasunetele nu mai influențează procesul de depolimerizare. Aceasta s-ar datora faptului că moleculele ajunse prin micșorarea lor la anumită mărime devin mai mult sau mai puțin rezistente la acțiunea distructivă a ultrasunetelor. În fig. 5.19 este redată după M. A. C. Mostafa degradarea polistirenului sub acțiunea unui cîmp ultrasonic de diferite intensități în funcție de durata de aplicare a acestui cîmp. Din cercetările întreprinse în această direcție se poate deduce că depolimerizarea poate fi considerată efectuată după un interval de timp de 30—100 minute variind cu intensitatea ultrasunetului folosit.

d) Studiul proceselor care au loc sub acțiunea ultrasunetelor au arătat că apa este un mediu favorabil pentru accelerarea și poate și pentru inițierea procesului de depolimerizare. Totuși s-a observat că procesul se desfășoară în bune condițiuni și în solvenți organici, (polari și nepolari).

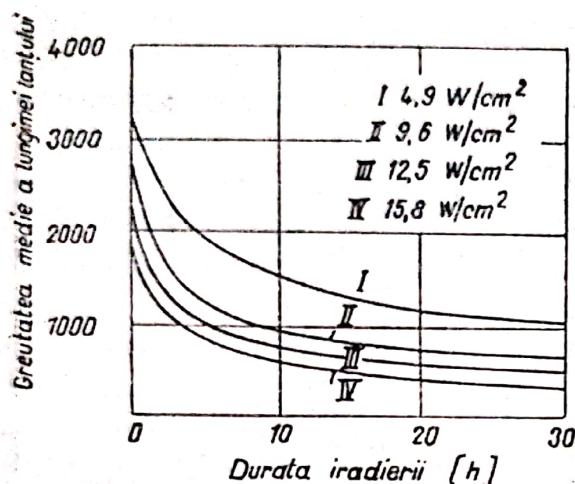


Fig. 5.19. Degradarea polistirenului sub acțiunea unui câmp acustic de diferite intensități, în funcție de durata de aplicare a câmpului.

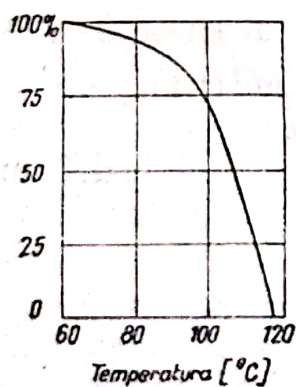


Fig. 5.20. Eficiența producerii procesului de depolimerizare în funcție de temperatura soluției.

Odată cu creșterea concentrației soluției, acțiunea distructivă a ultrasunetului scade, lucru care poate fi datorit faptului că diluantul este strâns legat de rețeaua polimerului și în felul acesta vibrează împreună, ne mai producându-se o frecare între acestea. Însă nici în soluții foarte diluate nu se obțin rezultate pozitive, deoarece în acest caz moleculele polimerului și ale diluantului pot să se deplaseze liber sub acțiunea undelor ultrasonice și în felul acesta se exclude mișcarea relativă a acestora, fapt care duce la forțe de frecare de mărimi reduse. Există așadar o concentrație optimă. În unele cazuri s-a observat o variație în producerea

procesului de depolimerizare în funcție de natura gazului dizolvat în soluție, însă aceste rezultate sînt contradictorii.

e) Ridicarea temperaturii soluției contribuie la favorizarea producerii procesului de depolimerizare, însă o temperatură excesivă împiedică desfășurarea acestui proces, așa după cum se vede din fig. 5.20. În această privință trebuie să se țină seama de faptul că iradierea cu ultrasunete a unui mediu este însoțită de o ridicare a temperaturii, ca urmare a absorbției energiei acustice în mediu.

f) Mărirea presiunii hidrostatice are un efect negativ asupra procesului de depolimerizare cu ajutorul ultrasunetelor, avînd în vedere că o presiune ridicată împiedică producerea cavitației acustice.

Întocmai după cum ultrasunetele contribuie la producerea procesului de depolimerizare, ele pot ajuta la desfășurarea unui proces contrar, anume de polimerizare. Această acțiune a fost examinată la un mare

număr de reacții constatându-se o accelerare a procesului. Astfel, în urma aplicării unui câmp ultrasonic asupra stirenului s-a constatat că după o iradiere de 40 minute, cantitatea de polimer obținută s-a dublat. La baza fabricării cauciucului sintetic stă polimerizarea emulsiei de butadienă. Prin aplicarea ultrasunetelor procesul de polimerizare a fost mult accelerat.

Mecanismul care stă la baza procesului de polimerizare cu ajutorul ultrasunetelor nu este încă bine precizat. Se pare că un rol important îl joacă și în acest caz cavitația acustică, în urma căreia se produce o disociere a apei, făcând să apară radicali liberi H și OH. Datorită acestor radicali s-a accelerat procesul de depolimerizare. Se presupune, de asemenea că un rol important în această acțiune revine oxigenului eliberat prin cavitație, și reacțiilor secundare ce se produc cu acest prilej. În plus, polimerizarea este ajutată și de acțiunea de depolimerizare, unele lanțuri de molecule rupându-se în timpul operației, rupturi care devin locuri de creștere, contribuind la accelerarea procesului de formare a polimerilor.

Examinându-se influența diferiților parametri fizici asupra procesului de polimerizare cu ajutorul ultrasunetelor, s-a constatat că eficacitatea este mărită atunci când se întrebuintează ultrasunete de frecvență relativ joasă și când durata iradierii este mărită. Se pare că rezultatele cele mai bune sînt obținute atunci când în decursul procesului se variază frecvența ultrasunetului, în sensul folosirii ultrasunetelor de frecvențe din ce în ce mai joasă. În cazul polimerizării emulsiilor întrebuintate la prepararea cauciucului sintetic cu ajutorul ultrasunetelor, eficiența maximă a procesului s-a obținut la o temperatură în jur de 40°C.

5.2.8. Uscarea cu ajutorul ultrasunetelor. Prin uscare se înțelege procesul care are ca scop extragerea lichidului dintr-un material. De cele mai multe ori lichidul care trebuie îndepărtat este apa, de unde și numele care se mai dă acestui proces, anume deshidratare. În mod obișnuit, uscarea se efectuează fie cu ajutorul unui procedeu termic, prin încălzirea materialului prin radiație, convecție, înaltă frecvență, fie cu ajutorul unui procedeu mecanic cum ar fi centrifugarea. Aplicarea ultrasunetelor la efectuarea acestui proces constituie o soluție cu totul nouă în acest domeniu.

Se știe că uscarea unui material poate fi caracterizată de viteza de evaporare la suprafața limită dintre lichid și gaz. Expresia acestei viteze este

$$v_{ev} = KS \frac{P-p}{p_0}$$

unde P este presiunea de saturație a vaporilor la temperatura lichidului,

p presiunea vaporilor în atmosfera înconjurătoare, p_0 presiunea gazului din atmosfera înconjurătoare, S suprafața materialului supus uscării, K un coeficient care depinde de gradul de turbulență a gazului de deasupra suprafeței de separare lichid-gaz.

Folosirea ultrasunetelor de intensitate mare face ca să crească viteza de evaporare, ca urmare a influențării a doi termeni cuprinși în relația de mai sus și anume: diferența presiunilor ($\Delta P = P - p$) și gradul de turbulență (K).

Cum undele acustice realizează o succesiune de zone de presiune și depresiune, ele fac să varieze considerabil cantitatea ΔP în puncte diferite ale materialului supus uscării. Experiența arată că efectul depresiunii este mai pronunțat întotdeauna decât cel al compresiunii și ca urmare se realizează o extragere continuă a apei din material, sub formă lichidă sau de vaporii. Mecanismul este analog cu cel care are loc la eliminarea apei prin sugere cu un burete supus la o serie de presiuni alternative. Intensitatea cu care este comprimat buretele poate avea o oarecare analogie cu amplitudinea presiunii undei acustice, în timp ce cadența cu care este comprimat și destins buretele, ar fi asemănătoare cu frecvența ultrasunetului.

Dar pe lângă acest mecanism, din cauza acțiunii ultrasunetului se mai produce deasupra suprafeței materialului supus uscării o turbulență intensă a gazului, care are ca efect mărirea vitezei de evaporare, deci accelerarea procesului de uscare.

Trebuie menționat că prin utilizarea ultrasunetelor, uscarea se efectuează la temperaturi scăzute, în comparație cu procesul care are loc prin folosirea procedeelor termice. Încălzirea interioară a masei tratate, datorită absorbției undelor ultrasonice și transformării energiei acustice în energie termică, este practic neglijată. Ridicarea temperaturii nu depășește un grad centezimal. Faptul că uscarea se efectuează la „rece” prezintă un mare avantaj al metodei ultrasonice, putând fi uscate o serie de materiale (produse chimice, produse alimentare, pulberi farmaceutice, materii biologice, rășini etc.), care nu suportă ridicări de temperatură din cauză că aceasta poate produce o descompunere a materialului sau o alterare a lor.

Întocmai ca și celelalte procese la care sînt utilizate ultrasunetele și în cazul uscării, eficacitatea procesului depinde de o serie de parametri, cum ar fi: intensitatea și frecvența ultrasunetului, durata tratării cu ultrasunete, natura și grosimea stratului materialului supus uscării.

În urma cercetărilor efectuate s-a constatat că intensitatea acustică constituie factorul principal care influențează viteza de uscare. În mod obișnuit se utilizează sunete și ultrasunete avînd nivelul de intensitate

acustică cuprins între 140 și 160 dB. Procesul de uscare avînd loc în aer, cele mai indicate emițătoare, care pot produce și nivelele necesare, sînt sirenele statice și dinamice.

Se pare, cel puțin pe baza rezultatelor obținute pînă în prezent, că frecvența nu joacă un rol prea important în procesul de uscare cu ultrasunete. Rezultate favorabile au fost obținute atît cu sunete de frecvențe ridicate cît și cu ultrasunete de frecvențe joase. Totuși, datorită inerției lichidului, există o frecvență limită inferioară care nu trebuie depășită. Astfel este indicat a nu se folosi frecvențe mai mici de 9 kHz. Cum influența frecvenței asupra eficacității procesului de uscare nu este mare, este recomandabil a se utiliza ultrasunete în loc de sunete, pentru a se feri operatorii care lucrează la instalațiile de uscare de acțiunea nocivă a sunetelor de intensități mari.

Cu cît stratul de material este mai subțire, cu atît el se usucă mai repede. În mod obișnuit trebuie să se ia grosimi în jur de 3—6 cm. Procesul de uscare se accelerează dacă particulele materialului supus uscării se găsesc în mișcare, sau dacă materialul este foarte afînat. În acest caz se mărește suprafața expusă acțiunii undelor acustice. În general, uscarea cu ajutorul ultrasunetului se efectuează într-un interval de timp mult mai scurt decît cel necesar uscării naturale. Astfel, prin utilizarea ultrasunetelor, uscarea lemnului verde se face doar în 5 min, în loc de 3 săptămîni.

Cu toate că cercetările în acest domeniu sînt încă la început și continuă, totuși au fost create și unele instalații industriale. O asemenea instalație a fost aplicată pentru prima dată în 1955 în R. P. Ungară, avînd ca scop uscarea fibrelor textile. Ultrasunetul, avînd o frecvență de 25 kHz, era produs de o sirenă dinamică. După datele autorilor Gregg și Mirtovics randamentul energetic al acestei instalații este de 10 ori mai mare decît cel corespunzător instalațiilor care utilizează metodele termice de uscare.

Uscarea cu ultrasunete a fost întrebuințată și pentru eliminarea ultimelor 1—2 procente de apă din zahăr, aflat în stare pudră sau tos. Această cantitate de apă deși mică este totuși suficientă pentru a duce la aglomerarea zahărului în bulgări pe timpul depozitării. Prin aplicarea unui cîmp ultrasonic pe o durată de aproximativ 16 min, întreaga cantitate de apă din masa zahărului este eliminată.

Au fost create și introduse în practică instalații variate de uscare cu ultrasunete.

Astfel o instalație pentru uscarea cu ultrasunete a materialelor care se prezintă sub formă de pulbere cuprinde un tambur, închis la ambele capete cu cîte o flanșă, în interiorul căruia se găsește suportul de susținere a materialului supus uscării. Suportul are o înclinare față de ori-

zontală, reglabilă, între 2—5% care să permită alunecarea cu o viteză redusă a materialului. Încărcarea se face printr-un canal la partea superioară a tamburului și evacuarea particulelor uscate se face pe la partea de jos a tamburului. Energia acustică este generată de o sirenă plasată

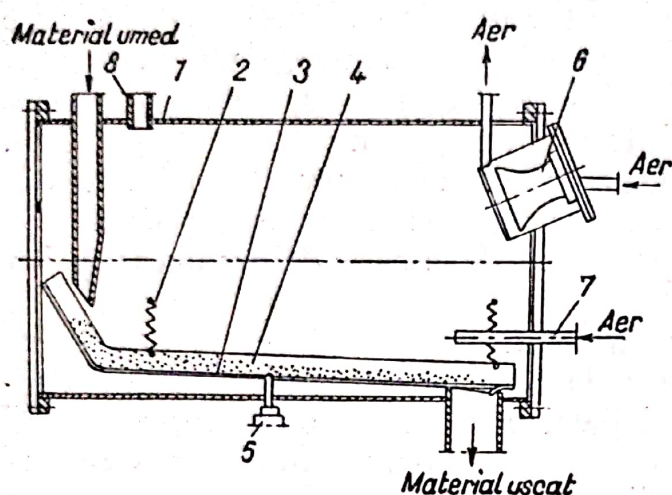


Fig. 5.21. Instalație de uscare cu ultrasunete cu transportor vibratil:

1 — cilindru; 2 — resorturi pentru susținerea transportorului; 3 — transportor; 4 — material supus uscării; 5 — excitator electromagnetic; 6 — sirenă ultrasonică; 7 — orificiu de introducerea aerului; 8 — orificiu de evacuarea aerului.

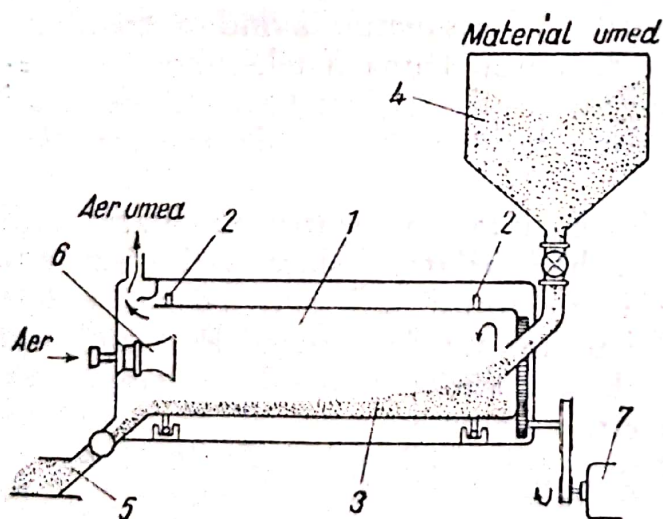


Fig. 5.22. Instalație de uscare cu ultrasunete cu transportor rotativ:

1 — tambur de uscare; 2 — coroane dințate; 3 — material supus uscării; 4 — buncăr de intrare; 5 — buncăr de descărcare; 6 — sirenă ultrasonică; 7 — motor.

într-un locaș practicat la una din flanșele tamburului (fig. 5.21). Axa sirenei este înclinată cu 20° față de orizontală. Instalația este prevăzută și cu un sistem de ventilație, aerul uscat pătrunzând printr-un tub ce străbate flanșa la partea de jos și aerul cu vapori de apă este evacuat printr-un tub vertical, ce străbate peretele tamburului.

O altă variantă a instalației descrisă mai sus este aceea la care tamburul este rotitor. În interiorul tamburului este un plan înclinat pe care alunecă în mod continuu particulele ce trebuie uscate. Pe timpul deplasării particulelor pe planul înclinat, ele sînt supuse acțiunii undelor ultrasonice generate de o sirenă, plasată într-un locaș în peretele camerei de tratare (fig. 5.22).

5.3. APLICAȚII PASIVE ÎN TEHNICĂ

Ultrasunetele de intensități reduse, în general sub valoarea la care se produc modificările structurale în mediul de propagare găsesc o largă aplicare în industria metalurgică și constructoare de mașini, în

industria construcțiilor și materialelor de construcții, în transporturi maritime, prin faptul că ele au dus la crearea unei serii de procedee pentru controlul pieselor și pentru măsurarea unor mărimi fizice și geometrice. Prin utilizarea ultrasunetelor de intensități reduse au fost puse bazele controlului nedestructiv al materialelor, a defectoscopiei ultrasonice, care se întrebuintează în mod curent în industrie. În plus, au fost concepute metode ultrasonice pentru măsurarea diferitelor mărimi fizice (modulul de elasticitate, rezistența mecanică, vîscozitatea, temperatura etc.), precum și a unor mărimi geometrice cum ar fi grosimea pieselor care nu prezintă decît o singură față accesibilă sau distanța dintre două puncte.

5.3.1. Defectoscopia ultrasonică. Detectarea cu ajutorul ultrasunetelor a defectelor (fisuri, goluri de aer, incluziuni, stratificații etc.) poate fi efectuată atît în piese metalice cît și în corpuri nemetalice (betoane, sticlă, materiale plastice etc.). Metodele se bazează pe însușirea pe care o au discontinuitățile dintr-un material de a împiedica transmisia energiei acustice, reflectînd o parte din această energie incidentă. În felul acesta orice schimbare de structură din cuprinsul corpului ce se examinează poate fi pusă în evidență. Tipurile de unde folosite în acest scop sînt unde longitudinale, unde transversale și unde de suprafață. În cazuri speciale ale controlului plăcilor sînt utilizate undele de plăcă.

Metodele ultrasonice de defectoscopie pot fi clasificate după sistemul de unde acustice folosite în acest scop: unde continue, impulsuri ultrasonice și unde modulate în frecvență, așa după cum se vede în schema din Anexa 1 (p. 308).

În cazul utilizării undelor continue, detectarea defectelor dintr-o piesă se poate efectua, fie prin examinarea modulului de transmisie a undelor în cuprinsul corpului care se examinează, fie prin punerea în evidență a fenomenului de rezonanță. Atunci cînd se folosește transmisia undelor acustice continue, defectul din interiorul unui corp poate fi pus în evidență prin una din următoarele metode: metoda umbrei sau metoda imaginii.

Metoda umbrei este cea mai veche metodă de defectoscopie ultrasonică, concepută de S. I. Sokolov în anul 1929. Un fascicul de unde longitudinale este introdus în interiorul corpului solid care se examinează. Atîta timp cît în cuprinsul fasciculului ultrasonic nu există vreun defect care să împiedice propagarea undelor, acestea ajung la suprafața opusă celei prin care undele au pătruns în corp și pot fi detectate cu ajutorul unui detector piezoelectric sau magnetostrictiv. Prezența unui defect în interiorul corpului face ca undele acustice să sufere o reflexie datorită diferenței dintre impedanțele caracteristice ale celor două medii. În acest

caz se creează o umbră în spatele defectului și în mod teoretic, detectorul nu mai este excitat de unde acustice. Un aparat indicator, conectat cu detectorul ultrasonic prin intermediul unui amplificator, poate pune în evidență prezența sau lipsa oricărui defect în piesa care se examinează (fig. 5.23).

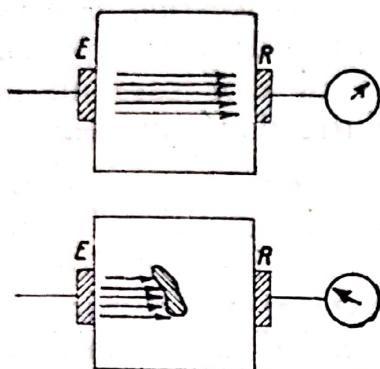


Fig. 5.23. Detectarea defectelor din interiorul pieselor metalice cu ajutorul metodei umbrei.

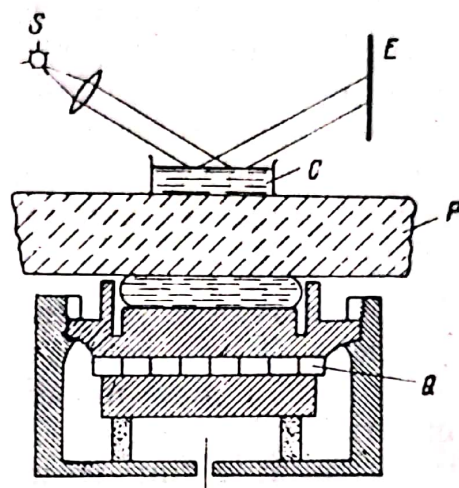


Fig. 5.24. Schema instalației de defectoscopie ultrasonică bazată pe metoda umbrei.

În forma concepută de Sokolov peste piesa care se examinează se așează o mică cuvă C , cu fundul bine șlefuit și cu o aderare cât mai perfectă de piesă P , prin intermediul unei pelicule de ulei. În cuvă se găsește un lichid, obișnuit ulei sau benzen. Pe suprafața acestui lichid cade un fascicul luminos generat de o sursă de lumină S . Atingând suprafața, fasciculul se reflectă și cade apoi pe un ecran E . Pata luminoasă formată pe ecran capătă diferite aspecte, ca urmare a modificării suprafeței lichidului sub acțiunea undelor ultrasonice care ajung la acest mediu după ce au traversat piesa examinată (fig. 5.24). Examinarea aspectului petei luminoase permite să se deducă anumite concluzii cu privire la omogenitatea piesei.

Metoda imaginii concepută în anul 1939 de Polhmann folosește tot unde ultrasonice continue, fasciculul străbătând piesa cufundată într-un lichid, obișnuit, apă sau xilol, care umple vasul V . Pe un perete al vasului este montat emițătorul ultrasonic E , constituit dintr-o placă piezoelectrică, iar în dreptul peretelui opus, care este transparent, se găsește suspendat în lichid un disc de aluminiu subțire (D). Acesta se comportă ca un disc Rayleigh, permițând detectarea undelor acustice care au străbătut corpul supus examinării și care sînt concentrate asupra discului

prin intermediul unei lentile acustice L (fig. 5.25). Devierile discului sub acțiunea undelor acustice pot fi puse în evidență observând abaterile unui fascicol de lumină, dirijat spre disc și reflectat de acesta. Imaginea poate fi focalizată cu ajutorul unei lentile optice L_1 . Dispozitivul este astfel reglat încît atunci cînd în lipsa vreunui defect în interiorul corpului undele acustice traversînd corpul sînt concentrate pe discul din aluminiu, îl fac să ia o poziție care formează cu poziția inițială un unghi determinat și pe ecran apare luminoasă imaginea sursei de lumină. În cazul în care în interiorul piesei există un defect care împiedică propagarea undelor ultrasonice, acestea nu mai au posibilitatea de a acționa discul din aluminiu și, ca o consecință, imaginea sursei de lumină apare pe ecran mai întunecată.

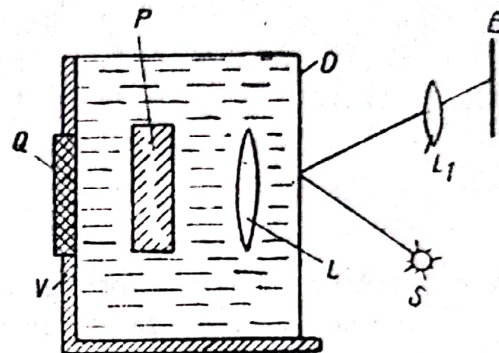


Fig. 5.25. Schema instalației de defectoscopie ultrasonică bazată pe metoda imaginii.

Metoda umbrei și a imaginii bazate pe transmisia undelor ultrasonice continui prin corpul supus examinării nu oferă o determinare precisă a unui defect în special atunci cînd acesta are dimensiuni reduse. Datorită fenomenului de difracție, undele ultrasonice ocolesc defectul iar unda ultrasonică creată nu este atît de netă ca o umbră produsă de un corp opac așezat într-un fascicol luminos. Din acest motiv este indicat a se folosi ultrasunete de frecvențe cît mai ridicate, însă aceasta duce la creșterea atenuării în mediul solid, ceea ce face să se limiteze frecvențele folosite pentru defectoscopia ultrasonică a pieselor metalice la aproximativ 10 MHz. În plus, aplicarea metodelor de defectoscopie prin transmisie nu permite localizarea defectului detectat în interiorul corpului și nici nu procură informații cu privire la forma și orientarea defectului.

Metodele prin transmisie cu unde continui sînt folosite în special la controlul pieselor care au grosime redusă deci prin care undele ultrasonice de frecvență ridicată nu suferă o atenuare pronunțată. O instalație de defectoscopie prin transmisie este utilizată cu bune rezultate pentru cercetarea defectelor în anvelopele de automobil, pentru detectarea ruperilor, a fisurilor și a locurilor de dezlipire a cauciucului de pînză. Trebuie observat că aceste metode nu necesită o aparatură complicată și costisitoare, iar efectuarea și interpretarea măsurărilor se poate face cu destulă ușurință.

Metoda rezonanței se bazează pe fenomenul formării undelor staționare în interiorul unui corp atunci când raportul dintre grosimea acestui corp și lungimea de undă a ultrasunetului folosit este un număr întreg. Stabilirea regimului de unde staționare se face prin variația frecvenței undelor longitudinale care au fost introduse în piesa care se examinează, cu ajutorul unui emițător piezoelectric montat la una din fețele piesei. Între viteza de propagare a undelor longitudinale prin mediul din care este constituit corpul, frecvența de rezonanță și grosimea piesei există relația

$$d = \frac{c}{2f_0} \quad (5.4)$$

care permite determinarea grosimii piesei (fig. 5.26).

Punerea în evidență a fenomenului de rezonanță se poate face cu un aparat indicator sau cu un osciloscop catodic, conectat la emițătorul piezoelectric care are funcția și de receptor. Indicarea netă a fenomenului de rezonanță se produce în cazul când fața pe care este aplicat palpatorul ultrasonic și fața opusă a acestuia sînt perfect paralele și în cazul când în interiorul piesei care se examinează nu există defecte. Apariția unor rezonanțe multiple, de mică amplitudine, este un indiciu că piesa conține defecte ca fisuri, pori sau incluziuni. În plus, măsurarea grosimii piesei permite controlul gradului de coroziune suferit de piesă, sub acțiunea unor agenți agresivi. În felul acesta poate fi determinat gradul de uzură a pereților unui cazan sau ai unei conducte metalice cu diametru mai mare de 20 cm.

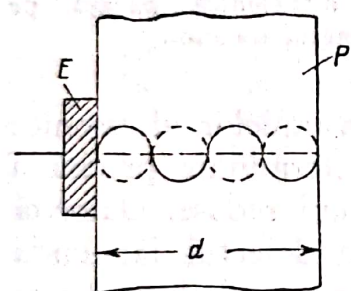


Fig. 5.26. Determinarea defectelor unui corp prin metoda rezonanței.

Metoda rezonanței prezintă avantajul de a permite controlul unei piese care are numai o singură față accesibilă, însă întocmai ca și metodele bazate pe transmisia undelor ultrasonice ea nu are posibilitatea precizării adîncimii la care se află defectul în interiorul corpului care se examinează.

Metodele cu impulsuri. Firestone a aplicat pentru prima dată în anul 1940 tehnica impulsurilor ultrasonice pentru detectarea defectelor în interiorul unui corp solid. De atunci metoda impulsurilor s-a dezvoltat continuu fiind utilizată la controlul atît al pieselor metalice cît și al pieselor nemetalice (de exemplu din beton). Datorită atenuării diferite a ultrasunetelor în propagarea lor prin corpuri izotrope (metale) față de propagarea în corpuri anizotrope (betoane) au fost concepute două metode

de defectoscopie care utilizează impulsuri ultrasonice și anume metoda reflexiei, aplicată în cazul corpurilor izotrope și metoda transmisiei, aplicată în cazul corpurilor anizotrope.

Principiul metodei reflexiei impulsului ultrasonic este următorul: Un emițător ultrasonic plasat pe una din suprafețele accesibile ale piesei, emite un tren foarte scurt de unde puternic amortizate și integrate într-un semnal unic care se propagă în interiorul piesei care se examinează. În cazul inexistenței vreunui defect, semnalul ajuns la fața opusă celeia unde se găsește emițătorul se reflectă, fiind detectat de un receptor independent sau de acelaș transductor piezoelectric care îndeplinește atât funcția de emițător cât și cea de receptor. Datorită intervalelor de timp foarte scurte care separă cele două semnale, emis și recepționat (ecou de fund), acestea sînt puse în evidență pe ecranul unui osciloscop catodic (fig. 5.27, *a*). Depărtarea dintre cele două semnale măsurată pe ecranul osciloscopului fiind proporțională cu durata propagării impulsului ultrasonic prin piesă, rezultă că scara orizontală a ecranului poate fi etalonată pentru a permite măsurarea directă a distanțelor în piesă.

În cazul cînd în interiorul piesei există un defect, impulsul ultrasonic suferă o reflexie, semnalul recepționat fiind pus de asemenea în evidență pe ecranul osciloscopului. În funcție de depărtarea existentă pe ecran între semnalul emis și semnalul ecou poate fi stabilită cu precizie adîncimea la care se găsește defectul. Așadar metoda permite nu numai detectarea unui defect dar și localizarea acestuia (fig. 5.27, *b*). Acest mod de punere în evidență a defectului se mai numește reprezentare tip *A*, pentru a-l deosebi de alte moduri de reprezentare denumite tip *B* și tip *C*, create în scopul de a oferi informații mai complete asupra localizării defectului în interiorul corpului examinat și a da posibilitatea unei interpretări cît mai ușoară.

La reprezentarea tip *B* pe ecranul osciloscopului apare imaginea unei secțiuni din piesa ce se examinează, punîndu-se în evidență odată cu limita superioară și inferioară a secțiunii zonei respective toate defectele existente în acea zonă. Pentru obținerea unei asemenea imagini palpatorul se deplasează în lungul piesei, mișcarea spotului luminos fiind sincroni-

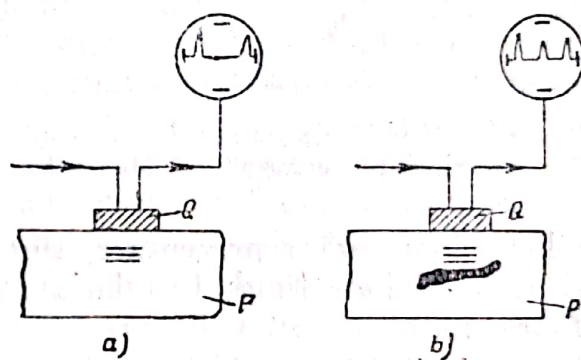


Fig. 5.27. Detectarea defectelor din interiorul pieselor prin metoda de impuls.

zată cu această deplasare. În plus, tubul catodic trebuie să posede o re-manență mare pentru ca imaginea să fie menținută un timp mai îndelungat, cel puțin pe durata unui traseu al palpatorului în lungul piesei (fig. 5.28).

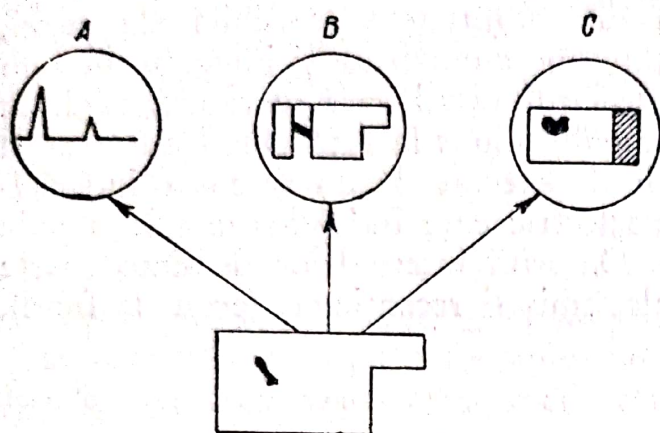


Fig. 5.28. Moduri de punere în evidență a defectelor pe ecranul osciloscopului.

telor, în această reprezentare, sînt eliminate imaginile impulsului inițial și al ecoului de fund. Instalația necesită un tub catodic cu o re-manență foarte mare.

Modurile de reprezentare B și C implică o instalație mai complexă decît modul de reprezentare A. Acestea sînt folosite în special în aplicațiile medicale, deoarece în controlul fabricației reprezentarea A dă satisfacție în cele mai multe cazuri.

În afară de localizarea defectului, metoda reflexiei permite și determinarea mărimii acestuia. Atunci cînd discontinuitatea pusă în evidență prin imaginea ecoului corespunzător este perpendicular pe direcția de propagare a undelor și mai mare decît lărgimea fascicolului ultrasonic, determinarea mărimii acestuia se poate face prin palparea conturului. În momentul în care axul fascicolului ajunge în dreptul uneia din marginile discontinuității, amplitudinile ecoului dat de discontinuitate și a ecoului de fund se reduc la jumătate din înălțimile lor maxime. Cealaltă margine a discontinuității se reperează în mod analog, iar deplasarea respectivă a palpatorului la suprafața piesei este egală cu mărimea discontinuității examinate.

În cazul în care defectul are dimensiuni mai mici decît lărgimea fascicolului ultrasonic, dar mai mare decît lungimea de undă, mărimea acestora poate fi calculată cu ajutorul unei relații aproximative stabilită de

Reprezentarea tip C, asemănătoare cu o radiografie cu raze X, permite a avea pe ecranul osciloscopului o imagine plană a întregii piese examinate. Aceasta se obține prin sincronizarea deplasării spotului luminos după două direcții perpendiculare, palpatorul fiind conectat atît la plăcile orizontale, cît și la cele verticale. Pentru eliminarea semnalelor nedorite care ar perturba semnalele de ecou datorite defec-

Krautkrämer pentru o discontinuitate avînd secțiunea circulară perpendiculară pe direcția de propagare a undelor

$$A = \left(\pi \frac{G}{L} \right)^2 \quad (5.5)$$

în care $A = A_d/A_r$, A_d fiind înălțimea imaginii ecoului produs de defect, iar A_r înălțimea imaginii ecoului de referință obținut prin reflexia undei de peretele opus al unei plăci avînd o grosime de zece ori mai mică decît lungimea cîmpului apropiat; $G = d/D$, d fiind diametrul discontinuității, iar D diametrul transductorului; $L = l/l_0$, l fiind adîncimea la care se găsește defectul, iar l_0 lungimea cîmpului apropiat.

Datorită atenuării mari pe care o suferă undele ultrasonice în corpuri anizotrope, prin aplicarea metodei cu impulsuri reflectate s-ar limita mult adîncimea pînă la care poate fi efectuat controlul. Din acest motiv se folosește o metodă de impuls prin transmisie, numită și *metoda timpului de propagare*. Principiul acestei metode este următorul: un transductor, avînd rolul de emițător, este plasat pe una din suprafețele corpului care se examinează și emite un tren de unde longitudinale, ne-armonizate și neintegrate într-un semnal unic. Undele se propagă în interiorul corpului, și după ce traversează corpul ajung la un al doilea transductor, care are rolul de receptor. După ce este amplificat, semnalul recepționat este transmis plăcilor verticale ale unui osciloscop catodic și imaginea acestuia apare pe ecranul aparatului. Atunci cînd în interiorul corpului nu există vreun defect unda ultrasonică se propagă în linie dreaptă, ajungînd la receptor, după un interval de timp t_1 . Dacă în interiorul corpului există un defect, unda ocolește defectul parcurgînd de această dată un drum mai lung, deci intervalul de timp necesar propagării devine t_2 , fiind cu atît mai mare cu cît dimensiunile defectului sînt mai mari. Datorită prezenței defectului $t_2 > t_1$. În acelaș timp se produce și o atenuare a undei. Avînd posibilitatea de a măsura, cu ajutorul unui marcator, durata de propagare a semnalului, ne putem da seama dacă în interiorul corpului examinat există un defect, iar din observarea atenuării semnalului pot fi stabilite cu oarecare aproximație dimensiunile și poziția defectului pus în evidență (fig. 5.29).

La controlul pieselor metalice cele mai utilizate metode sînt metoda cu impulsuri reflectate și metoda transmisiei undelor continui. În cazul materialelor anizotrope (betoane) cea mai folosită este metoda timpului de propagare.

Posibilitățile pe care le oferă metodele ultrasonice pentru punerea în evidență și localizarea unui defect în interiorul unui corp solid depind

de o serie de factori, cum ar fi: poziția defectului în raport cu poziția palpatorului, natura și dimensiunile defectului, forma și orientarea acestuia față de fasciculul ultrasonic. Detectarea unui defect este posibilă atunci când acesta se găsește într-o zonă cuprinsă între două limite, o

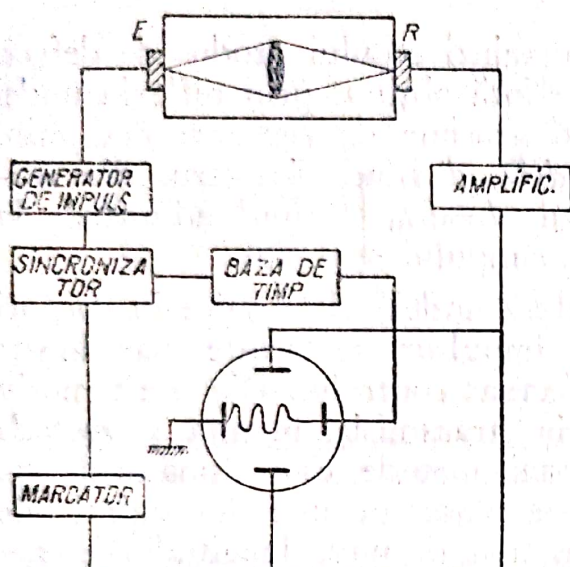


Fig. 5.29. Schema defectoscopului ultrasonic bazat pe metoda timpului de parcurs.

adâncime minimă și una maximă, măsurate de la suprafața corpului pe care se aplică palpatorul. Adâncimea minimă depinde de natura materialului care intră în compoziția piesei care se examinează, condiționând viteza de propagare a undelor ultrasonice, și de puterea de rezoluție a osciloscopului catodic. Folosind un aparat la care viteza de măturare este de $2 \text{ mm}/\mu\text{s}$, poate fi pus în evidență orice defect aflat în piese de oțel sau aluminiu la o adâncime mai mare de 6 mm. Această valoare rezultă din faptul că un traseu de 12 mm, cât parcurge semnalul direct și ecoul acestuia, este străbătut în aceste metale în aproximativ $2 \mu\text{s}$.

Pentru detectarea unor defecte superficiale, situate în regiunea în care metoda reflexiei cu unde longitudinale nu mai poate procura informații pot fi folosite unde de suprafață. Acestea posedă proprietatea de a se propaga în cuprinsul unor straturi superficiale subțiri, având grosimi cuprinse între $5 \lambda_s$ și $10 \lambda_s$, unde λ_s este lungimea undei de suprafață. Ele prezintă și avantajul unei propagări cu o viteză în medie de două ori și ceva mai mică decât undele longitudinale. Dacă se mai adaugă și faptul că undele Rayleigh suferă o reflexie mai pronunțată la suprafața de separare dintre materialul corpului și defectul conținut, rezultă clar motivul pentru care aceste unde și-au găsit în prezent o întrebuințare atât de largă în defectoscopia ultrasonică, completând controlul efectuat cu unde longitudinale în zona în care acestea se dovedesc în imposibilitatea de a localiza defectul.

Distanța pînă la care se poate găsi un defect în interiorul unei piese pentru a se obține un ecou detectabil depinde de intensitatea ecoului față de intensitatea semnalelor parazite. Cum imaginea corespunzătoare semnalului provenit din reflexia undelor de suprafață limitatoare a unui defect trebuie să apară pe ecranul osciloscopului mai pronunțată decât

imaginile semnalelor parazite, este necesar ca intensitatea acustică a undei introduse în corpul care se examinează să fie cât mai mare și atenuarea suferită în material să fie cât mai redusă. Cunoșcând că intensitatea undelor acustice emise într-un corp solid nu depinde numai de puterea și mărimea emițătorului ultrasonic ci și de cuplajul existent între acesta și suprafața corpului, rezultă ca o necesitate realizarea unui cât mai bun cuplaj. Acesta se poate obține, fie prin imersarea în totalitate, sau numai parțial al corpului într-o baie de apă sau de ulei în care se găsește plasat și emițătorul ultrasonic, fie prin aplicarea palpatorului pe suprafața piesei prin intermediul unui strat de cuplaj alcătuit dintr-o peliculă de ulei sau glicerină. Ultima soluție se dovedește a fi mai ușor de pus în practică, însă în acest caz suprafața piesei trebuie să fie cât mai netedă. Cu cât frecvența ultrasunetelor este mai mare, cu atât se cere un grad de prelucrare mai înalt al suprafeței piesei, putându-se considera corespunzătoare o suprafață metalică ale cărei rugozități nu depășesc 0,003 mm.

Așa după cum s-a arătat, atenuarea undelor ultrasonice într-un mediu solid depinde de natura mediului și de frecvența ultrasunetelor, crescând pe măsură ce frecvența crește. Pentru mărirea bătăii instalației ar rezulta ca avantajoase undele de frecvență cât mai coborâtă. Cum alte considerente care influențează precizia determinărilor și care vor fi examinate în cele ce urmează, impun utilizarea unor frecvențe cât mai ridicate, rezultă că în alegerea frecvenței de lucru, trebuie să se țină seama de toți factorii de care depinde acest parametru. Din acest motiv domeniul de frecvență indicat a fi utilizat variază cu natura materialului și cu felul pieselor supuse controlului ultrasonic, așa după cum rezultă din tabela 5.5 și 5.6.

Tabela 5.5

Domeniul de frecvențe MHz	Natura materialului
0,025 — 0,1	Beton, lemn, roci, cauciuc
0,200 — 1,0	Fontă cenușie
0,500 — 2,0	Fontă cu grafit nodular. Materiale plastice, materiale ceramice
1,0 — 5,0	Oțel, aluminiu, alamă. Metale cu granule fine
3,0 — 20,0	Sticlă

În cazul pieselor metalice care prezintă o bună transparență ultrasonică (oțeluri forjate sau laminate, aluminiu etc.) adâncimea maximă pînă la care este posibilă detectarea unui defect poate atinge 10 m. Din acest punct de vedere metodele de defectoscopie ultrasonică oferă posibilități mai mari decît alte metode similare cum ar fi cu raze X sau cu raze gama, pentru a nu mai socoti controlul electromagnetic sau cu soluții penetrante, care este posibil să fie executat numai la suprafața piesei sau la adâncimi foarte mici, în general sub 10 mm.

Tabela 5.6

Domeniul de frecvență MHz	Felul pieselor
0,250 — 0,500	Lingouri. Piese turnate mari
0,500 — 1,0	Piese forjate mari
0,500 — 2,0	Îmbinări nituite
2,0 — 2,5	Osii de locomotivă și vagoane
2,0 — 3,0	Bandaje de roți pentru material rulant
2,5 — 5,0	Tuburi. Butelii. Palete de turbină
3,0 — 6,0	Table sudate. Sîrme. Roți dințate

Detectarea defectului fiind bazată pe reflectarea ultrasunetului, obținută atunci cînd unda este obligată să treacă dintr-un mediu în alt mediu cu proprietăți elastice și densități diferite, rezultă că reflectarea cea mai puternică se obține în cazul asocierii metalului cu un gaz. Cu alte cuvinte o fisură sau un gol de aer în interiorul piesei sînt cele mai simplu de detectat, deoarece produc reflexiile cele mai puternice; acestea se traduc prin semnale de amplitudini mari, care apar pe ecranul osciloscopului catodic.

O reflexie mai puțin pronunțată are loc atunci cînd unda ultrasonică întâlnește altfel de suprafațe discontinui, cum ar fi aceea dintre corpul metalului și o incluziune, care poate fi ori un corp străin înglobat în masa metalului, ori un constituent caracteristic al metalului (un compus intermetalic). În sfîrșit, reflexii și mai reduse sînt cauzate de schimbări

structurale mai mici, cum ar fi variații ale mărimii granulelor, variații care în mod normal nu pot fi izolate decât numai dacă ele s-ar întinde pe suprafețe mai mari și ar fi comparate, pe baza unei experiențe anterioare, cu caracteristicile cunoscute ale structurii materialului, rezultate în urma măsurărilor de atenuare ale ultrasunetelor prin materialul considerat.

Sensibilitatea controlului ultrasonic depinde de mărimea relativă a defectului în raport cu lărgimea fasciculului caracterizată prin unghiul de deschidere al acestuia (2θ). La 1.4.2 s-a arătat că

$$2\theta = \arcsin \left(1,22 \frac{\lambda}{a} \right)$$

depinzând de frecvența ultrasunetului și de diametrul palpatorului. Cu cât frecvența ultrasunetului este mai ridicată și diametrul palpatorului mai mare, cu atât se obține o divergență mai redusă și o sensibilitate mai mare. Pot fi astfel detectate defecte de dimensiuni reduse, în schimb zona controlată se micșorează.

Alegerea valorilor corespunzătoare frecvenței undelor ultrasonice și diametrului palpatorului se face în raport cu natura materialului, mărimea pieselor și cu sensibilitatea ce se caută a se obține. Domeniul de frecvențe indicat a fi utilizat este menționat în tabelele de mai sus. În ce privește diametrul palpatorului, acesta ajunge până la 50 mm în cazul pieselor mari, scăzând la aproximativ 10 mm în cazul examinării pieselor de dimensiuni reduse.

În afară de divergența fasciculului emis, un rol important îl are și caracteristica de directivitate a receptorului. În cazul folosirii metodei umbrei este necesar ca diametrul palpatorului de recepție să aibă un diametru cât mai redus pentru a mări în același timp precizia și sensibilitatea controlului. Cu ajutorul metodelor ultrasonice pot fi puse în evidență defecte ale căror lungimi sînt de ordinul a 2—4 mm, avînd grosimea de 0,01—1 mm. Această posibilitate face ca defectoscopia ultrasonică să fie superioară altor metode de control, de exemplu controlului electromagnetic, cu ajutorul căruia nu pot fi puse în evidență defecte cu o grosime mai mică decât 10—30 mm, sau controlului cu soluții penetrante la care defectele minime detectabile trebuie să aibă grosimi mai mari de 5—10 mm. În plus, durata efectivă folosită pentru executarea unui control cu ultrasunete este practic cu 80% mai scurtă decât durata necesară efectuării controlului acelorași piese cu ajutorul razelor X sau gama, deoarece zonele fără defecte nu necesită o înregistrare a rezultatelor pe film. Din această cauză, precum și datorită faptului că aparatura

folosită în defectoscopia ultrasonică este mai ieftină și consumul de energie electrică mai redus, prețul de cost al controlului cu ultrasunete este sensibil mai mic față de controlul radiografic. În sfârșit, trebuie adăugat și faptul că controlul ultrasonic nu implică luarea unor măsuri de protecție speciale, avînd în vedere că ultrasunetele nu sînt nocive nici pentru operatori nici pentru cei care lucrează în imediata vecinătate a locului unde se efectuează operația.

Tendința actuală în ce privește controlul ultrasonic este de a se automatiza procesul operației și acest lucru este cu atît mai ușor de aplicat cu cît forma obiectului care se examinează este mai simplă (tuburi, table, cuzineți, bandaje de roți pentru material rulant etc.). Controlul se poate efectua în cadrul procesului tehnologic de fabricație. Astfel, controlul automat al tablelor cu ajutorul ultrasunetelor se face imediat după laminare fără răcirea prealabilă a acestora. Pentru ca temperatura ridicată să nu afecteze palpatoarele, cuplajul se efectuează în general prin intermediul unui strat de lichid.

Unele instalații automate de defectoscopie ultrasonică sînt prevăzute cu dispozitive de semnalizare optică sau acustică pentru semnalizarea prezenței unui defect în piesa examinată. Alte defectoscoape, comandînd monitoare, au posibilitatea de a sorta tablele după numărul și mărimea defectelor, eliminîndu-se în mod automat produsele necorespunzătoare. Instalațiile automate permit o viteză de lucru apreciabilă. Astfel, în cazul controlului barelor sau țevelor, acestea pot trece prin fața palpatorului ultrasonic cu o viteză de aproximativ 100 cm/sec. iar în cazul examinării cordoanelor de sudură viteza de deplasare a palpatorului este de 10 cm/s. Pentru controlul șinelor de cale ferată montate, defectoscopul ultrasonic este instalat pe un vagon care conține un boghiu special pe care sînt fixate palpatoarele, vagonul putîndu-se deplasa cu o viteză de 20—30 km/oră, însă aparatajul poate funcționa cu rezultate satisfăcătoare și la viteze mult mai mari. În plus tendința actuală este a se obține înregistrări ale controlului prin filmarea ecranului osciloscopului catodic sau prin marcarea pe o bandă de hîrtie a defectelor. În felul acesta se înlătură greșelile de interpretare ale operatorului și există posibilitatea de a se păstra un document privind calitatea piesei examinate.

În scopul efectuării unui control cît mai obiectiv și a înlăturării posibilității de interpretare greșită din partea operatorului a semnalelor convenționale ce apar pe ecranul osciloscopului catodic, s-a căutat să se vizualizeze defectele din interiorul pieselor, adică să se obțină o imagine vizibilă a zonei care se examinează cu ajutorul ultrasunetelor. Transformarea imaginilor acustice în imagini vizuale se face în două etape. Într-o primă etapă are loc transformarea imaginii acustice într-una elec-

trică, operație executată cu ajutorul unui convertizor electrono-acustic, iar în etapa a doua se produce transformarea imaginii electrice rezultate într-o imagine vizibilă, operație care se realizează cu mijloacele specifice televiziunii.

Convertizorul electrono-acustic, așa cum a fost conceput de S.I. Sokolov, R. Pohlman și alții, este constituit dintr-un tub catodic 1 al cărui ecran a fost înlocuit cu o placă piezoelectrică 2, care îndeplinește rolul de receptor ultrasonic. După ce au străbătut corpul care se examinează unde ultrasonice sînt concentrate cu ajutorul unei lentile acustice, obișnuit din plexiglas, pe suprafața anterioară a plăcii piezoelectrice, în planul căreia se formează imaginea acustică a regiunii explorate. Datorită efectului piezoelectric, presiunile acustice exercitate asupra plăcii dau naștere unor sarcini electrice. În interiorul tubului, un fascicul electronic 3, comandat de generatorii 7 și 8, mătură suprafața posterioară a plăcii piezoelectrice. Ca urmare, în fiecare punct al suprafeței se produce o emisie secundară de electroni, al căror număr depinde de sarcina electrică existentă în punctul respectiv. Electronii proveniți din emisia secundară sînt captați de electrodul colector 4, făcînd să apară un curent variabil, funcție de distribuția de sarcini electrice existente pe fața plăcii piezoelectrice. După ce este amplificat cu ajutorul preamplificatorului 9 și a amplificatorului 10, acest curent este introdus în tubul catodic 5 și modulează fasciculul de electroni 6. În felul acesta se produce o imagine vizibilă pe ecranul tubului catodic (fig. 5.30).

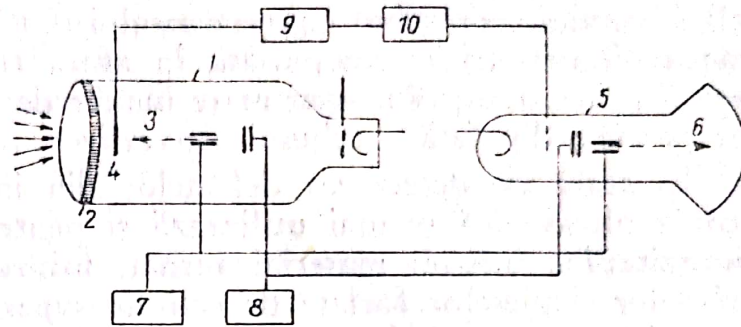


Fig. 5.30. Schema de principiu a convertizorului electronoacustic:

1 — iconoscop; 2 — placă piezoelectrică; 3 — fascicul electronic; 4 — electrod colector; 5 — tub catodic; 6 — fascicul electronic; 7, 8 — bază de timp; 9 — preamplificator; 10 — amplificator.

Sensibilitatea unui asemenea dispozitiv de vizualizare este limitată de zgomotul preamplificatorului. La un raport semnal zgomot egal cu 1/10, intensitatea acustică atinge valoarea de 10^{-9} W/cm², suficientă pentru a se obține o imagine destul de clară pe ecranul osciloscopului 5.

Cu toate posibilitățile pe care le oferă, utilizarea în practică a convertizoarelor electrono-acustice este foarte limitată. Aceasta se datorește în special dificultății de realizare a unei perfecte etanșezări a tubului

catodic 2, atunci cînd un perete al acestuia este constituit din placa piezoelectrică. Folosirea cristalelor de cuarț permite obținerea unei etanșeități mai bune față de cazul utilizării ceramicilor piezoelectrice, însă limitează mult diametrul de lucru al convertizorului. O soluție a problemei a fost dată de P. K. Ochtșepkov și colaboratorii prin separarea plăcii ceramice de tubul convertizorului. La aparatul construit de aceștia, placa piezoelectrică este plasată în afara tubului, iar legătura se realizează prin intermediul unui mare număr de electrozi fini care sînt sudați pe peretele din față a tubului convertizor.

În afară de detectarea defectelor din interiorul corpurilor, defectoscopia ultrasonică se mai utilizează și pentru stabilirea nivelului microporozităților într-un material turnat, utilizat ulterior la confecționarea tabelor și pieselor forjate de calitate superioară. În acest scop se folosesc ultrasunete avînd frecvența cuprinsă între 1 și 4 MHz.

5.3.2. Determinarea proprietăților elastice și de structură ale materialelor. Măsurarea modulului de elasticitate longitudinal. Ținînd seama de legea lui Hooke, modulul de elasticitate longitudinal este definit ca raportul dintre efortul unitar de întindere (σ) aplicat asupra materialului și alungirea specifică (ϵ) rezultată, adică

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.6)$$

Funcția $\sigma = f(\epsilon)$ este liniară, coeficientul unghiular al dreptei fiind modulul de elasticitate longitudinal (fig. 5.31, a).

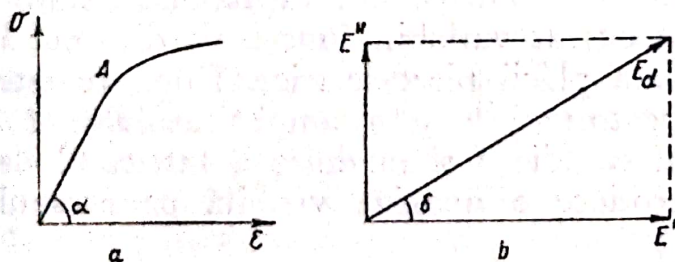


Fig. 5.31. Modulul de elasticitate longitudinal:
a — modulul de elasticitate definit prin legea lui Hooke; b — modulul de elasticitate dinamic.

Legea lui Hooke face abstracție de pierderile de energie mecanică produse în material, ca urmare a frecării interne, care face ca o parte din energia mecanică introdusă în material să fie transformată ireversibil în căldură. Dacă se iau în considerație și aceste pierderi, care nu pot fi neglijate în cazul multor medii, cum

ar fi polimerii înalți, caucicul sau unele corpuri rigide anizotrope (beton, roci), atunci curba efort-deformare nu mai este o dreaptă, ci ia forma unei bucle de histerezis. Teoria arată că pierderile în material pot fi

deduse prin introducerea în relația (5.6) a unui modul de elasticitate dinamic E_d care este de această dată o mărime complexă de forma

$$E_d = E' + jE'' \quad (5.7)$$

Această mărime fizică este foarte importantă permițând să se cunoască modul de comportare al unui material atunci cînd este supus la sollicitări dinamice. Evaluarea pierderilor în material se poate face cu ajutorul tangentei unghiului δ (fig. 5.31, *b*), care se poate calcula efectuînd raportul dintre partea imaginară și partea reală a expresiei (5.7) adică

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'} \quad (5.8)$$

Metoda ultrasonică de măsurare trebuie să permită determinarea modului de elasticitate dinamic, lucru posibil prin calcularea pe baza datelor măsurătorilor a celor două componente ale sale. Pentru stabilirea mărimilor care trebuie măsurate în acest scop, este necesar să se deducă în prealabil expresiile componentelor reală și imaginară ale modului de elasticitate dinamic.

Considerăm o serie de unde longitudinale care se propagă în lungul unei bare, al cărei diametru este mic în comparație cu lungimea de undă. Notînd cu E_d modulul de elasticitate dinamic corespunzător materialului din care este confecționată bara și cu ρ densitatea acestui material, ecuația de propagare a undelor este:

$$E_d \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (5.9)$$

unde ξ reprezintă deplasarea particulei. Soluția ecuației (5.9) este

$$\xi = \xi_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma x} \quad (5.10)$$

în care γ este constanta de propagare ($\gamma = \alpha + j\beta$), semnificațiile lui α și β fiind cele indicate la (1.105).

Introducînd această soluție în ecuația (5.9), rezultă relația de condiție

$$(E' + jE'')(\alpha + j\beta)^2 = -\omega^2 \rho \quad (5.11)$$

Egalînd părțile reale și părțile imaginare între ele, rezultă expresiile componentelor modului de elasticitate dinamic

$$E' = \frac{(\beta^2 - \alpha^2) \rho \omega^2}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} = \frac{\rho c^2 (1 - \alpha^2 c^2 / \omega^2)}{(1 + \alpha^2 c^2 / \omega^2)^2} \quad (5.12)$$

și

$$E'' = \frac{2\alpha\beta\rho\omega^2}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} = \frac{2\rho c^2 \alpha c / \omega}{(1 + \alpha^2 c^2 / \omega^2)^2} \quad (5.13)$$

Se constată că modulul de elasticitate dinamic se poate obține din componentele sale în urma măsurării vitezei de propagare (c) și a constantei de atenuare (α) a undei, măsurarea putându-se efectua prin una din metodele indicate în capitolul 4. În cazul când pierderile în interiorul materialului sînt foarte reduse, deci când α se poate neglija, relația (5.13) tinde către zero, modulul de elasticitate avînd numai o componentă reală, egală cu $E = \rho c^2$. Deci se poate determina la aceste materiale modulul de elasticitate longitudinal prin măsurarea vitezei de propagare a undei acustice.

În cazul a numeroase soluții de polimeri, a cauciucului sau a unor corpuri rigide, constanta de atenuare nu numai că nu se poate neglija, dar are o valoare atît de mare încît nu este posibilă măsurarea directă a acestui parametru și a vitezei de propagare a undei. Datorită acestei situații, determinarea modulului de elasticitate dinamic se poate face prin măsurarea componentelor impedanței caracteristice a materialului care se examinează, impedanță definită ca raportul dintre efortul unitar aplicat și viteza particulei.

Efortul este determinat de ecuația

$$\sigma = E_a \frac{\partial \xi}{\partial x} = c E_a (\alpha + j\beta) e^{(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t}. \quad (5.14)$$

Vitezei particulei, care este derivata în funcție de timp a expresiei deplasării particulei, îi corespunde relația

$$u = \frac{\partial}{\partial t} (\xi) = j\omega c e^{(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t}. \quad (5.15)$$

Raportul expresiilor (5.14) și (5.15) definește impedanța caracteristică

$$Z_0 = \frac{\sigma}{u} = \frac{E_a (\alpha + j\beta)}{j\omega} = R + jX, \quad (5.16)$$

în care R reprezintă partea reală (rezistența caracteristică) și X reprezintă partea imaginară (reactanța caracteristică).

Relația (5.16) se mai poate scrie

$$(E' + jE'') (\alpha + j\beta) = jR\omega - X\omega. \quad (5.17)$$

Întrucît ambele părți ale egalității cu $(\alpha + j\beta)$ și ținînd seama de (5.11), rezultă

$$-\omega \rho = (jR - X) (\alpha + j\beta). \quad (5.18)$$

de unde pot fi deduse expresiile α și β în funcție de rezistența și de reacțanța caracteristică a mediului, anume

$$\alpha = \omega \rho \frac{X}{R^2 + X^2} \quad (5.19)$$

și

$$\beta = \omega \rho \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (5.20)$$

Înlocuind pe α și β în (5.12) și (5.13), se obține pentru componentele modului de elasticitate expresiile

$$E' = \frac{R^2 - X^2}{\rho} \quad \text{și} \quad E'' = \frac{2RX}{\rho} \quad (5.21)$$

Aplicarea acestui procedeu implică măsurarea rezistenței și reactanței caracteristice a materialului. Operația poate fi executată cu ajutorul unui dispozitiv, indicat în fig. 5.32, care constă dintr-o bară a cărei impedanță caracteristică Z_b se cunoaște, avînd fixată la un capăt transductorul electroacustic, obișnuit un emițător piezoelectric, iar la celălalt capăt materialul a cărui impedanță se măsoară. Făcînd să se propage în bară unde longitudinale, acestea vor suferi o reflexie la suprafața de separare a celor două medii în contact, factorul de reflexie, care este o cantitate complexă datorită defazajului care se produce între presiunea acustică a undei incidente și presiunea acustică a undei reflectate, se obține din

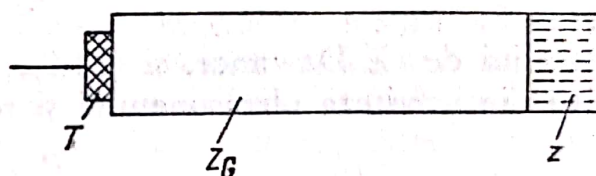


Fig. 5.32. Dispozitiv pentru măsurarea rezistenței și reactanței caracteristice ale unui material.

$$\frac{p_r}{p_i} = r e^{j(\pi - \theta)} = \frac{Z - Z_b}{Z + Z_b} \quad (5.22)$$

unde θ este unghiul de fază.

Scoțînd din (5.22) pe Z , rezultă

$$Z = Z_b \frac{1 - r^2 + j 2r \sin \theta}{1 + r^2 + j 2r \sin \theta} \quad (5.23)$$

În general impedanța barei Z_b este și ea o cantitate complexă. Folosînd însă ca mediu de propagare a undelor un cristal la care pierderile de energie acustică sînt foarte reduse, se poate considera Z_b o cantitate reală. Măsurînd factorul de reflexie și unghiul de fază, cu ajutorul rela-

ției (5.23) se pot calcula cele două componente ale impedanței caracteristice a mediului ce se probează.

Valoarea metodei ultrasonice de determinare a modulului de elasticitate dinamic rezidă în posibilitatea efectuării operației fără distrugerea materialului, direct pe ansamblul în care acesta este montat. În plus, cu ajutorul acestei metode poate fi urmărită în timp variația modulului de elasticitate al materialului unei piese supuse la solicitări variabile sau care manifestă o îmbătrânire în urma funcționării.

Determinarea rezistenței betonului la compresiune. Posibilitatea determinării modulului de elasticitate dinamic al unui corp solid prin măsurarea vitezei de propagare a ultrasunetului prin acel corp și stabilirea unei corelații între modulul de elasticitate dinamic și rezistența mecanică a materialului din care este făcut corpul, a permis determinarea acestui parametru fizic, metoda aplicându-se în special în cazul betoanelor. Pe baza relațiilor

$$E_d = k\sqrt{R} \quad (5.24)$$

stabilită de G. Dawance, și (3.50), s-a putut deduce o relație aproximativă dintre viteza ultrasunetului și rezistența betonului avînd forma

$$R = Ac^B, \quad (5.25)$$

unde A și B sînt doi coeficienți care depind de caracteristicile betonului și de condițiile în care se efectuează măsurarea, iar c este viteza de propagare a ultrasunetelor în mediu.

Determinarea rezistenței mecanice a betonului prin intermediul modulului de elasticitate dinamic prezintă o serie de inconveniente care contribuie la micșorarea preciziei și anume: dificultatea stabilirii cu precizie a coeficientului lui Poisson dinamic la betoane, intervalul relativ mare de variație al coeficientului k etc. Din acest motiv s-a căutat să se stabilească o relație directă între viteza de propagare a ultrasunetelor prin beton și rezistența mecanică a acestuia la compresiune. Pe baza datelor obținute prin măsurători, s-a dedus relația

$$R = Ae^{Bc} \quad (5.26)$$

în care A și B sînt doi coeficienți care depind de elementele care intră în compoziția betonului și de modul de păstrare al betonului care se încearcă. Acești coeficienți sînt independenți de vîrsta betonului începînd de la o limită inferioară de 3 zile. Pentru betoane în compoziția cărora intră agregate de rîu, se poate admite că B este constant și egal aproximativ cu 1,00.

În scopul obținerii unei precizii cât mai ridicate a măsurătorilor, s-a căutat să se determine care sînt parametrii care influențează relația dintre viteza de propagare a ultrasunetelor și rezistența la compresiune. Parametrii luați în considerare sînt: raportul apă-ciment, modul de comportare a betonului, natura cimentului, natura și granulozitatea agregatelor, dozajul de ciment, umiditatea betonului, temperatura de păstrare pe timpul întăririi betonului. Unii din acești parametri influențează rezistența mecanică, în timp ce alții contribuie la modificarea vitezei de propagare a undelor longitudinale. Astfel, natura cimentului care intră în compoziția betonului face să varieze net rezistența, fără însă a modifica substanțial viteza de propagare a undelor, în timp ce natura agregatului influențează mult mai mult viteza ultrasunetelor decît rezistența mecanică.

Dacă nu se depășește o limită superioară peste care se produce segregarea betonului, compactarea nu exercită vreo influență asupra relației dintre viteza de propagare a undelor și rezistența la compresiune, aceasta datorită faptului că modul de compactare exercită o aceeași influență asupra fiecărui element în parte. În cazul betoanelor insuficient compactate, care conțin goluri mari, neregulate și neuniform distribuite, există variații importante în ceea ce privește valoarea vitezei. Aceste variații au fost semnalate în special la betoanele preparate pe șantier, insuficient compactate și mai puțin au fost găsite la probele confecționate în laborator. De asemenea variații mari ale vitezei s-au semnalat și în cazul elementelor de beton deteriorate de foc sau supuse la anumite condiții climatice, cum ar fi de exemplu înghețul.

Rezistența la compresiunea betonului fiind funcție de viteza de propagare a undelor acustice, așa cum arată relația (5.25), s-a căutat să se stabilească un indicator care să permită aprecierea aproximativă a calității betonului, pe baza valorii măsurate a vitezei. Această apreciere se poate face ținîndu-se seama de indicațiile cuprinse în tabela 5.7.

Tabela 5.7

Viteza de propagare a undelor m/s	Rezistența la compresiune (aproximativă) kgf/cm ²	Calitatea betonului
Pînă la 2000	Pînă la 30	Cu totul nesatisfăcătoare
2000 — 3000	30 — 60	Nesatisfăcătoare
3000 — 3500	60 — 100	Satisfăcătoare
3500 — 4000	100 — 220	Bună
4000 — 4500	220 — 400	Foarte bună
Peste 4500	Peste 400	Excelentă

În urma experienței acumulate prin aplicarea metodei ultrasonice de determinare a rezistenței mecanice a betonului, au putut fi stabilite unele limite ale preciziei acestei metode și anume:

— 10—17% în cazul în care există datele necesare privind compoziția și modul de păstrare a betonului ce se încearcă și a corpurilor de probă cu ajutorul cărora să poată fi verificată relația de transformare stabilită;

— 17—24% în cazul în care există numai datele privind compoziția și modul de păstrare a betonului care se încearcă;

— 24—40% în cazul în care nu se posedă nici o dată precisă cu privire la compoziția și modul de păstrare a betonului, aceste date fiind apreciate de operator pe baza experienței sale proprii.

Metoda de măsurare a rezistenței la compresiune cu ajutorul ultrasunetelor a fost extinsă și la elementele din beton armat, avînd în vedere că influența armăturii din oțel asupra vitezei de propagare a undelor longitudinale este în general foarte mică. Aceasta în special atunci cînd sînt folosite ultrasunete de frecvență joasă. Armăturile transversale pe direcția de propagare a undelor au în general o influență mai redusă asupra rezultatelor măsurărilor decît armăturile dispuse longitudinal, conducînd la erori de ordinul 3—5% pentru viteză și de 10—15% pentru rezistență. Efectul armăturilor se manifestă cu deosebire la stîlpii mai puternic armați.

Pe lîngă viteza ultrasunetelor, atenuarea undelor care se propagă printr-un element de beton poate fi folosită la determinarea rezistenței la compresiune a betonului. Aceasta se bazează pe faptul că porozitatea materialului, existența fisurilor, neomogenitățile contribuie în acelaș timp la modificarea rezistenței mecanice, dar și la micșorarea transparenței ultrasonice, producînd o mărire a atenuării undelor. Un beton bine compactat, avînd o rezistență la compresiune mare, nu este caracterizat numai prin valori mari ale vitezei de propagare a undelor longitudinale, ci și printr-o atenuare mai mică a undei, care se traduce printr-o amplitudine mai mare a semnalului recepționat. Cu toate că și măsurarea atenuării undelor poate constitui un procedeu indicat pentru determinarea rezistenței betoanelor, totuși aplicarea sa în practică a întîrziat datorită unor dificultăți tehnice cum ar fi găsirea unui cuplant adecvat între transductor și materialul care se probează, folosirea celei mai potrivite tehnici de măsurare a atenuării, determinarea presiunii cu care trebuie aplicate transductoarele pe elementul din beton etc. În plus, cercetările au arătat modul în care rezistența la compresiune variază cu atenuarea undelor în funcție de natura cimentului, natura și granulozitatea agregatelor, modul de păstrare a betonului și alți parametri.

Cercetarea structurii materialelor. Măsurarea gradului de atenuare a undelor acustice în propagarea acestora printr-un material permite obținerea de informații cu privire la structura acestuia dat fiind că atenuarea depinde de mărimea mijlocie a granulelor. Pentru a se putea determina mărimea granulelor s-a căutat să se stabilească o corelație între constanta de atenuare și raportul dintre diametrul mediu al granulei și lungimea de undă al ultrasunetului. După W. P. Mason și W. Roth pentru aluminu, magneziu, cupru, fier și alamă ar fi valabilă relația

$$\alpha = k \frac{d^3}{\lambda^4} \quad (5.27)$$

O altă relație propusă de Wolrton pentru alamă are forma:

$$\alpha = k \left(\frac{d}{\lambda} \right)^m \quad (5.28)$$

iar în cazul oțelurilor, pe cale experimentală s-a ajuns la următoarele valori ale coeficienților k și m :

$m=3k=0,10$ pentru structuri perlitice;

$m=3k=0,035$ pentru structuri intermediare.

O altă metodă pentru determinarea mărimi granulelor constă în creșterea frecvenței ultrasunetului pînă cînd reflexiile de pe fața posterioară a probei nu mai sînt observate pe ecranul osciloscopului catodic. Se obține astfel o frecvență de tăiere. Constatîndu-se că atunci cînd lungimea de undă a ultrasunetelor devine egală cu de trei ori diametrul mediu al granulei, atenuarea nu mai poate fi măsurată, rezultă că prin intermediul lungimii de undă corespunzătoare frecvenței de tăiere, poate fi determinat diametrul granulei ($d=\lambda/3$). O asemenea metodă a fost folosită de H. L. Dunegan pentru măsurarea mărimii granulelor în uraniu. Rezultatele comparative obținute prin aplicarea metodei ultrasonice și prin examinare metalografică sînt indicate în tabelul 5.8.

Tabela 5.8

Proba Nr.	Temperatura de tratare °C	Timpul de tratare	Mărimea granulei (mm)	
			Metoda ultrasonică	Metalo- graf
$\beta - 11$	700	30 min	$d > 0,686$	0,0635
$\beta - 12$	640	1 min	0,0254 — 0,0889	—
$\beta - 13$	640	1 oră	0,0279 — 0,0889	0,0160
$\beta - 14$	640	8 ore	0,0305 — 0,0914	0,0160
$\beta - 15$	640	20 ore	0,0230 — 0,1016	0,0181
$\beta - 16$	640	60 ore	0,0381 — 0,1168	0,0188
$\beta - 17$	640	5 min	0,0254 — 0,0762	0,0119
$\beta - 18$	800	30 min	0,0279 — 0,686	0,1600

Cercetări privind corelația dintre atenuarea undelor, exprimată prin adâncimea de pătrundere a semnalului ultrasonic în material și dimensiunile medii ale granulelor au fost efectuate și de A. Bernath și V. Șerban, aplicând această metodă la controlul osiilor de vagoane.

Dat fiind dependența unor caracteristici mecanice ale materialului, de exemplu, rezistența, de mărimea granulelor, măsurătorile de atenuare a undelor ultrasonice fac posibilă determinarea acestor caracteristici mecanice. În plus, faptul că transparența ultrasonică printr-un material variază atunci când acesta este supus unor eforturi de tracțiune sau compresiune statice sau dinamice a permis conceperea unor metode bazate pe măsurarea constantei de atenuare care să dea posibilitatea determinării stării de tensiune la care este supus materialul, precum și gradului de oboseală a unei piese metalice.

Efectuând măsurători de atenuare a undelor ultrasonice propagându-se prin elemente din beton. I. Făcăoaru, precum și C. N. Avram și colaboratorii au putut studia procesele fizico-chimice de hidratare și de întărire a betoanelor și a pietrei de ciment, luându-se în considerare probe vibrante și nevibrate.

Cu toate că solurile sînt medii mult mai puțin omogene decît betoanele și rocile cristaline îngreunînd determinările constantelor de propagare a undelor ultrasonice, fiind dificil a se obține date reproductibile, totuși au fost întreprinse cercetări pentru a se determina modul de variație a vitezei și atenuării undelor în funcție de natura solului, consistența acestuia, umiditatea și greutatea sa volumetrică etc. Cu ajutorul undelor acustice, avînd frecvențe cuprinse între 30 și 300 kHz, au putut fi efectuate prospecțiuni geologice în scopul detectării straturilor de sare sau a zăcămintelor de petrol. Datorită atenuării mari pe care o au undele ultrasonice atunci când se propagă prin scoarța pămîntului au putut să fie folosite puteri destul de ridicate, în special atunci când s-a lucrat cu frecvențe mai înalte.

Ultrasunetele au fost întrebuințate cu rezultate pozitive și la studiul terenurilor pentru a se constata eficiența diferitelor tratamente aplicate pentru ameliorări sau pentru a se examina sedimentele în bazinele de apă cu ocazia construcțiilor hidrotehnice.

5.3.3. Determinarea parametrilor fizici în fluide. *Măsurări cu ultrasunete în lichide.* Dependența vitezei undelor acustice de compresibilitatea mediului, de temperatură și de vîscozitatea acestuia a permis obținerea valorilor acestor mărimi fizice prin efectuarea de măsurători ultrasonice.

Determinarea compresibilității, adiabatică (k) se poate face pe baza măsurării vitezei de propagare a undelor, cunoscînd că între aceste două

mărimi există relația (3.37). Metoda ultrasonică folosită în acest scop este importantă pentru cercetarea lichidelor la temperaturi și la presiuni mari, inclusiv a domeniului critic. Instalația cu ajutorul căreia se efectuează această determinare este destul de simplă, implicând doar o autoclavă cu termostat, un generator de frecvență înaltă și transductoarele respective, emițătorul și receptorul ultrasonic.

Determinarea temperaturii unui lichid cu ajutorul ultrasunetelor se bazează pe măsurarea vitezei de propagare a undelor, ca o funcție a presiunii, folosindu-se relația

$$c = c_0 (1 + kp) \quad (5.29)$$

unde c_0 este viteza undelor corespunzătoare presiunii zero. În cazul heliului ca gaz ea este dată de relația

$$c_0 = \sqrt{\frac{5}{3} \frac{RT}{M}} \quad (5.30)$$

unde R este constanta gazului, T temperatura absolută, M masa moleculară.

În urma măsurării vitezei c avându-se posibilitatea calculării mărimii c_0 , se poate determina cu ușurință din (5.30) valoarea temperaturii absolute. Această metodă permite măsurarea temperaturilor foarte înalte și în special foarte coborâte, existente în oxigenul lichid și în heliul lichid.

Principiul care stă la baza măsurării cu ajutorul ultrasunetelor a vîscozității unui lichid este acela al variației amortizării vibrațiilor elastice ale unei plăcuțe, care este făcută să vibreze într-un lichid. În cazul unui lichid la care valoarea modulului de elasticitate transversal este neglijabilă, factorul de amortizare (α) al vibrațiilor unei plăci metalice subțiri avînd grosimea d imersată în acest lichid, este dat de relația

$$\alpha = \frac{1}{2\rho_m d} \sqrt{\rho \omega_0 \eta} \quad (5.31)$$

în care ρ_m este densitatea materialului din care este făcută placa metalică, ρ densitatea lichidului, η vîscozitatea lichidului, ω_0 pulsația corespunzătoare frecvenței de rezonanță.

Cunoscînd mărimile ρ_m , d și ω_0 , constante în cazul unei instalații date, prin măsurarea factorului de pierdere se poate determina cu ușurință vîscozitatea lichidului de densitate ρ , care se examinează.

Există două tipuri de vîscozimetre acustice, de vibrație și cu impulsuri. Diferența între ele constă nu în principiul măsurării vîscozității, ci în

felul excitației utilizate, excitație cu unde continue sau excitație cu impulsuri.

Principalul avantaj al vîscozimetrelor acustice îl prezintă posibilitatea măsurării continue și deci a controlului permanent al vîscozității unui lichid, fapt ce prezintă o deosebită însemnătate în numeroase procese tehnologice din industria chimică, a petrolului, alimentară etc. În plus, pentru efectuarea măsurării este suficient o cantitate redusă de lichid, metoda pretîndu-se a fi automatizată.

Măsurarea vitezei de propagare a undei pentru un mediu lichid în mișcare, viteză care este afectată de deplasarea masei de lichid, permite determinarea debitului. În acest scop se folosește un impuls ultrasonic care străbate o distanță determinată în masa lichidului, între un prim-transductor care l-a emis și un al doilea transductor care-l recepționează. Cunoscînd această distanță (d) și avînd posibilitatea măsurării duratei (t) de parcurgere de către semnalul ultrasonic a distanței specificate mai sus, se poate calcula viteza de curgere a lichidului v_l din relația

$$t = \frac{d}{c \pm v_l} \quad (5.32)$$

unde c este viteza de propagare a undelor acustice prin lichidul considerat.

Avînd în vedere diferența mare dintre cele două viteze, metoda este lipsită de precizie. Din acest motiv s-a căutat folosirea altor fenomene care intervin în propagarea undelor ultrasonice, unul din acestea fiind efectul Doppler. În acest scop sînt emise alternativ, între două transductoare, semnale ultrasonice, unul în sensul curentului de fluid și celălalt în sens contrar. Datorită adunării, respectiv scăderii vitezelor ultrasunetelor și fluidului, rezultă diferența de fază, care poate fi măsurată. Ca urmare poate fi determinată viteza de curgere a lichidului și deci debitul acestuia.

Debitmetrele ultrasonice prezintă avantajul de a efectua o măsurare continuă fără a modifica practic debitul lichidului datorită dimensiunilor reduse ale transductoarelor și mai ales posibilității amplasării acestora în pereții conductei (fig. 5.33). Asemenea dispozitive sînt folosite în numeroase domenii în care alte tipuri de debimetre nu-și găsesc aplicarea. Este cazul măsurării debitului lichidului de răcire în reactorii nucleari, măsurării debitului unor substanțe corosive sau nocive, fără modificarea proceselor tehnologice, situație întîlnită frecvent în industria chimică etc.

Măsurări cu ultrasunete în gaze. Măsurarea vitezei de propagare a undelor acustice într-un mediu gazos oferă posibilitatea determinării unor

mărimi fizice necesare în practică cum ar fi valorile căldurilor specifice sub volum constant și sub presiune constantă, ca și raportul acestora, temperatura gazului, densitatea acestuia. Asemenea metode își găsesc utilitatea în special la studiul gazelor rarefiate și al aburilor supraîncălziți sau aflați la presiuni ridicate, măsurătorile ultrasonice fiind mai simple și mai ușor de efectuat decât măsurătorile calorimetrice. Ele își găsesc aplicație la măsurători în turbine cu gaz, în camerele de combustie ale avioanelor cu reacție, în diferite cuptoare.

Măsurarea temperaturii unui gaz cu ajutorul ultrasunetelor se poate face prin măsurarea vitezei de propagare a undelor, cunoscând că între cele două mărimi fizice există relația (3.3) în cazul gazelor ideale, sau relația

$$c = \sqrt{\kappa \frac{RT + 2Bp}{M}} \quad (5.33)$$

unde B este constanta ecuației lui Van der Waals și p presiunea gazului, în cazul gazelor reale.

Precizia determinării temperaturii depinde pe de o parte de exactitatea cu care sînt cunoscute caracteristicile gazului (compoziția sa chimică, presiunea, umiditatea) și pe de altă parte de precizia măsurării vitezei ultrasunetului. Au putut fi efectuate determinări ale temperaturii unui gaz cu o precizie de $\pm(0,8-1)\%$.

Din punct de vedere practic, aplicarea acestei metode prezintă însă dificultăți în special atunci cînd trebuie determinate temperaturi ridicate. Aceasta se datorește faptului că transductorul emițător și cel receptor trebuie plasate în zona în care este necesar să fie stabilită valoarea temperaturii, lucru care poate duce la distrugerea materialului din care este confecționat transductorul. O metodă recentă preconizează îndepărtarea transductoarelor de zona cu temperatură ridicată prin introducerea unei cavități rezonante cuplate cu transductorul ultrasonic. În acest caz, determinarea temperaturii se face pe baza măsurării frecvenței ultrasunetului,

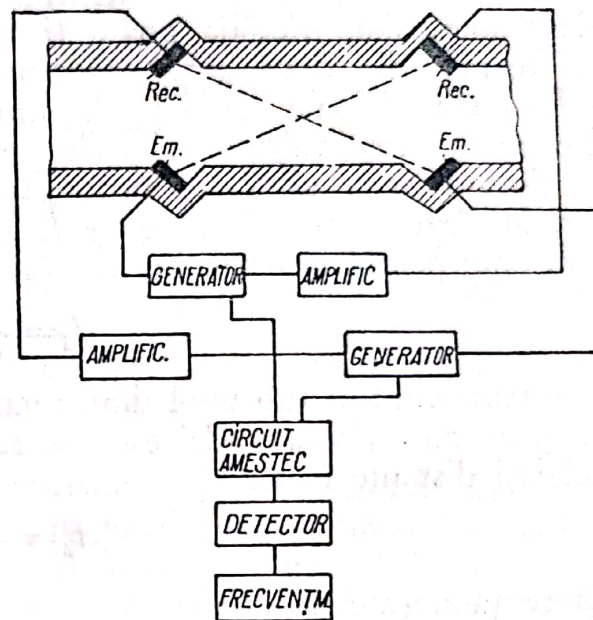


Fig. 5.33. Schema instalației cu ultrasunete pentru măsurarea debitului.

cunoscînd că frecvența de rezonanță depinde de temperatura gazului din cavitatea de rezonanță.

Analiza unui gaz poate fi făcută cu ajutorul ultrasunetelor, cunoscînd că viteza de propagare a undelor într-un amestec binar are o valoare intermediară între valorile vitezelor corespunzătoare gazelor care alcătuiesc amestecul. Metoda poate fi aplicată doar atunci cînd amestecul este format din două gaze cunoscute, ale căror viteze de propagare a undelor sînt diferite, precizia determinării fiind cu atît mai mare cu cît diferența dintre valorile vitezelor gazelor componente este mai mare.

Notînd cu c_1 viteza de propagare a undelor prin amestecul de gaze introdus într-un tub de lungime l , rezultă că timpul necesar semnalului ultrasonic pentru a parcurge această distanță este

$$t_1 = \frac{l}{c_1}. \quad (5.34)$$

Introducînd în tub unul dintre gazele pure, componente ale amestecului, prin care viteza undei este c_2 , rezultă că timpul necesar parcurgerii aceleiași distanțe l este

$$t_2 = \frac{l}{c_2}. \quad (5.35)$$

Diferența duratelor

$$\Delta t = t_1 - t_2 = l \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right) \quad (5.36)$$

creiază un defasaj între semnalul transmis și cel recepționat care poate fi pus sub forma

$$\theta = 2\pi f \Delta t = 2\pi f l \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right) \quad (5.37)$$

în care f este frecvența undelor acustice.

Cum viteza c_1 variază cu concentrația amestecului, ca urmare a modificării densității, rezultă că prin măsurarea diferenței de fază se poate determina proporția fiecărui gaz ce intră în compoziția amestecului. Pentru o lungime dată și o anumită frecvență a ultrasunetului, dispozitivul de măsurare poate fi etalonat în procente pentru analiza unui anumit amestec de gaze. Au fost create asemenea instalații pentru determinarea procentului de gaz metan în aer.

Avantajul metodei ultrasonice de analizarea gazelor constă în lipsa totală de inerție, în independența determinărilor față de variațiile presiunii atmosferice, în posibilitatea analizei amestecurilor explozive, metoda avînd sensibilitatea destul de ridicată și o precizie bună. Metoda ultrasonică se pretează și la analizarea amestecurilor alcătuite din mai multe componente, considerîndu-le ca amestecuri binare (gazul de dozat și restul

de gaze). Deși acest lucru nu este întotdeauna posibil, el poate fi totuși realizat în numeroase cazuri practice.

Pe baza principiului similitudinii poate fi cercetată comportarea din punct de vedere acustic a unei săli, pe macheta acesteia, folosind în acest scop în loc de sunete ultrasunete. Se știe că dacă dimensiunile unei încăperi sînt reduse de n ori față de dimensiunile încăperii reale, pentru a se obține o reproductibilitate fidelă a fenomenelor acustice din această încăpere, trebuie folosite în modelul de dimensiuni reduse, unde acustice avînd frecvența de n ori mai mare. Cu cît scara de reducere este mai mică, cu atît frecvența trebuie să fie mai ridicată. Folosirea undelor ultrasonice permite construirea de machete de dimensiuni reduse, pînă la scara $1/20$, sau chiar $1/25$, în care caz frecvențele undelor ultrasonice excitatoare a spațiului închis pot ajunge pînă la 200 kHz.

În afară de reducerea la o scară determinată a dimensiunilor sălii și de reproducerea fidelă a tuturor detaliilor constructive din sala care se proiectează este necesar ca suprafețele delimitatoare ale machetei să ofere pentru ultrasunete o aceeași absorbție acustică ca și suprafețele care delimitează sala reală pentru sunetele corespunzătoare. Numai în această situație fenomenele fizice care au loc în interiorul machetei sînt reproductibile, și metoda ultrasonică de măsurare conduce la rezultate concludente. Măsurătorile acustice pe modele reduse, folosindu-se în acest scop ultrasunete, permit să se stabilească durate de reverberație, să se depisteze zonele de focalizare a sunetului, să se determine zonele în care energia acustică este mai redusă, punîndu-se în evidență și ecourile, cînd acestea se produc. Metoda permite să se studieze în plus comportarea diferitelor elemente constructive ale sălii în asigurarea unei cît mai bune difuzități a sunetului, putîndu-se preciza cu această ocazie forma și dimensiunile optime ale acestora. Metoda ultrasonică de studiere acustică a unei săli pe modelul redus al acesteia este relativ simplă, suficient de precisă și este foarte economică, deoarece cercetările în vederea asigurării unei bune audibilități într-o sală proiectată se pot efectua prin modificarea machetei, lucru ce n-ar putea fi posibil sau ar fi foarte costisitor de făcut în sala reală.

5.3.4. Măsurarea grosimilor cu ajutorul ultrasunetelor. Măsurarea grosimii unei piese poate fi efectuată folosindu-se fie unde ultrasonice continue, fie impulsuri ultrasonice. În primul caz măsurarea se face cu ajutorul metodelor de rezonanță, iar în cel de-al doilea caz cu ajutorul metodelor cu impulsuri prin reflexie sau prin transmisie.

Cele mai utilizate în acest scop sînt metodele de rezonanță, în care caz sînt utilizate unde longitudinale emise de un transductor, obișnuit piezoelectric, aplicat pe una din fețele plăcii a cărei grosime trebuie

măsurată. Propagându-se prin material, undele suferă o reflexie atunci când ajung la suprafața de separare a elementului examinat de alt mediu cu care acesta se găsește în contact de exemplu un gaz, un lichid sau chiar un mediu solid, avînd impedanță caracteristică diferită de cea a materialului din care este constituită placa. Prin variația frecvenței, respectiv a lungimii de undă, pot fi create unde staționare între suprafețele care limitează placa, producîndu-se în felul acesta rezonanța (fig. 5.34). Dacă acest fenomen se produce la frecvența fundamentală a plăcii examinate, între grosimea d a acestei plăci și lungimea de undă λ , respectiv viteza c și frecvența f_0 a ultrasunetului, există relația cunoscută

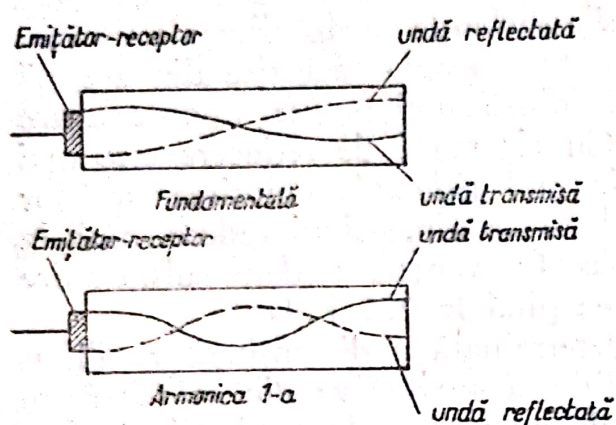


Fig. 5.34. Măsurarea grosimii unei piese cu ajutorul undelor ultrasonice continue.

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_0}$$

Punerea în evidență a rezonanței poate fi făcută optic, folosindu-se un aparat indicator sau un semnal care apare pe ecranul unui osciloscop catodic sau acustic producîndu-se la rezonanță un semnal audibil în casca operatorului.

Cunoscîndu-se viteza de propagare a ultrasunetului în materialul din care este făcută placa și măsurîndu-se frecvența de rezonanță se poate calcula grosimea plăcii respective. Instalațiile moderne au scara gradată, permițînd citirea directă a valorilor grosimii. Dacă etalonarea scării este făcută pentru un anumit material, obișnuit oțelul, pentru a se putea utiliza instalația și la măsurarea grosimilor corpurilor confecționate din alte materiale, valorile citite trebuie înmulțite cu un factor de transformare, a cărui valoare este indicată în tabela 5.9.

Tabela 5.9

Materialul	Factor de transformare	Materialul	Factor de transformare
Oțel	1,00	Fier	0,93
Aluminiu	1,24	Magneziu	0,96
Argint	0,60	Nichel	0,95
Bachelită	0,44 — 0,60	Plumb	0,36
Bronz	0,89	Polistiren	0,45
Cupru	0,79	Sticlă	0,80 — 1,10

Metoda de rezonanță prezintă avantajul că permite măsurarea de grosimi la piese care au o singură față accesibilă, metoda putându-se aplica în acest scop la pereții recipientilor, carenelor sau fundurilor de nave, cazanelor sau conductelor, pentru a se evalua gradul de coroziune a acestor pereți. În plus, metoda permite măsurarea grosimii stratului călit sau a gradului de cementare a oțelurilor speciale. Limitele între care pot fi măsurate grosimile cu ajutorul acestei metode sînt destul de largi, domeniul fiind cuprins între 0,1 mm și cîțiva centimetri. Metoda este simplă, rapidă, și este suficient de precisă, precizia de măsurare fiind cuprinsă între 0,1—3%, funcție de natura și omogenitatea materialului care se examinează, de starea suprafeții piesei, de domeniul de frecvență utilizat etc. Măsurarea grosimilor se poate face în mod continuu, fără întreruperea funcționării piesei sau a unui proces tehnologic. Cu o asemenea metodă nu pot fi obținute însă date cu privire la grosimea medie pe o suprafață mare. Ea dă numai indicații asupra grosimii piesei în dreptul emițătorului ultrasonic. Dacă există numeroase variații în grosimea piesei în zona de propagare a undelor longitudinale, nu poate fi obținută condiția de rezonanță. De aceea metoda se pretează foarte bine la măsurarea grosimilor în cazul corpurilor care au fețele paralele (tuburi, conducte, table, cazane etc.).

Metodele cu impulsuri folosite pentru determinarea grosimilor implică măsurarea duratei care se scurge de la emiterea impulsului ultrasonic în piesa care se examinează pînă la recepționarea acestui impuls la fața opusă (metoda prin transmisie) sau a ecoului semnalului transmis în urma reflexiei sale de fața opusă (metoda prin reflexie). Notînd această durată cu t relațiile de calcul corespunzătoare celor două metode sînt

$$d=ct, \text{ respectiv } d=ct/2.$$

Aplicarea metodei prin transmisie necesită ca ambele fețe ale plăcii să fie accesibile, în timp ce metoda prin reflexie, în tocmai ca și metoda rezonanței poate fi aplicată și în cazurile în care placa are numai o singură față accesibilă.

Metoda prin reflexia impulsurilor permite determinarea de grosimi cuprinse 0,5 cm și 500 cm, cu o precizie de 2—3%. Măsurările pot fi efectuate atît în cazul pieselor cu suprafețe plane, cît și a celor cu porțiuni curbe ale suprafețelor accesibile. În acest scop, se folosesc palpatoare plane, în primul caz, și palpatoare curbe, în cel de-al doilea caz, curbura palpatorului trebuind să fie cît mai apropiată de cea a suprafeței care se examinează.

În măsurările de grosimi se utilizează ultrasunete avînd frecvențe cuprinse între 1 și 15 MHz, valoarea adoptată depinzînd de natura

materialului și de mărimea grosimii care trebuie determinată. Astfel, pentru piesele din fontă, se recomandă o frecvență mai mică de 2 MHz, în timp ce la materialele cu granulație fină frecvența de examinare este mai mare de 1,5 MHz.

5.3.5. Sondajul și reperajul submarin. O grupă importantă de măsurări ce se efectuează cu ajutorul ultrasunetelor o constituie măsurările în mediul acvatic, avînd ca scop determinarea adîncimii fundului mării. Instalația, numită *ecolot*, montată la bordul navelor, este de un real folos în navigație și în explorările submarine.

Principiul metodei este următorul: de la suprafața apei se emite un impuls ultrasonic, dirijat după verticală. Atingînd fundul apei, unda se reflectă și ecoul ajuns la suprafață este recepționat. Măsurîndu-se durata de propagare a semnalului și a ecoului rezultat prin reflexia de fund și cunoscînd viteza medie de propagare a undelor acustice în apa mării, se poate determina adîncimea păturii de apă. Operația se efectuează în mod continuu și cu ajutorul unui sistem de înregistrare, se înscrie pe o bandă de hîrtie, care se deplasează cu o viteză constantă, profilul fundului apei. Se obține în felul acesta o *batigramă*.

Emiterea și detectarea semnalelor ultrasonice poate fi făcută fie de către un transductor unic, care îndeplinește alternativ rolul de emițător și de receptor, fie de două transductoare, fiecare avînd o funcție bine precizată, de emițător și de receptor. Cea de a doua soluție este de preferat în special la măsurarea adîncimilor mici, de oarece dacă s-ar folosi în asemenea cazuri un singur transductor, vibrația elementului emițător nu s-ar amortiza complet, în momentul în care ecoul reflectat de fund atacă transductorul. La instalațiile de ecolot se folosesc atît transductoare piezoelectrice (cu cuarț, cu titanat de bariu sau cu sare Segnette), cît mai ales transductoare magnetostrictive cu tole din nichel sau cu ferite.

Măsurarea adîncimii păturii de apă este influențată de mai mulți factori și anume: frecvența ultrasunetului, frecvența de repetare a impulsurilor, intensitatea ultrasunetului, poziția transductoarelor pe corpul navei, zgomotul de fond, reverberația mării.

În alegerea frecvenței ultrasunetului trebuie avut în vedere pe de o parte atenuarea undelor în apa mării, care implică o valoare cît mai coborîtă a frecvenței pentru a se asigura bătaia necesară, și pe de altă parte deschiderea cît mai mică pe care trebuie s-o aibă fascicolul ultrasonic, care implică o valoare cît mai ridicată a frecvenței. Între aceste două cerințe diametral opuse, în practică se ia o valoare medie. La instalațiile moderne, frecvența ultrasunetului variază între 15 kHz și

80 kHz, însă frecvențele cele mai obișnuite sînt cuprinse între 15 kHz și 30 kHz.

Efectuarea măsurării în mod continuu necesită o frecvență de repetare a impulsurilor cît mai mare, cu toate acestea intervalul de timp dintre două impulsuri succesive trebuie să fie superior duratei de parcurgere a traseului urmat de semnalul emis și de ecoul acestuia. Cum adîncimile care se măsoară sînt variabile, și frecvența de repetare a impulsurilor ultrasonice trebuie să fie variabilă, iar acest lucru este realizat la unele instalații moderne. La acestea frecvența de repetare a semnalelor este reglabilă, începînd de la o valoare în jur de 7 impulsuri pe secundă, valabilă pentru măsurări pînă la o adîncime de 100 m, scăzînd pe măsură ce adîncimea crește. Atunci cînd se măsoară adîncimi mai mari de 1 000 m trebuie ca intervalul de timp dintre două impulsuri succesive să fie de cel puțin 2 secunde.

Ținînd seama de atenuarea pe care undele ultrasonice o suferă în apa mării, datorită difuziei cauzată de variațiile de temperatură și de salinitate în lungul traseului semnalului și datorită pierderilor de energie produse din cauza bulelor de aer sau de gaz existente în apa mării și în urma reflexiei de fundul apei, intensitatea semnalului emis trebuie să fie suficient de mare pentru ca ecoul să poată fi detectat. Această condiție se realizează prin adoptarea unui transductor cu o putere acustică destul de ridicată și cu o directivitate mare, care să asigure un fascicul cu o deschidere redusă și un cuplaj cît mai bun între transductor și mediul de propagare a undei. Se consideră favorabil un unghi de deschidere a fascicolului de 20° . Din cauza necesității alegerii unei frecvențe cît mai coborîte, deci a unei lungimi de undă relativ mari, asemenea valoare a unghiului de deschidere a fascicolului se obține prin mărirea dimensiunilor elementului emițător. Suprafața de radiație variază obișnuit între 5 și 300 cm². Chiar dacă măsurarea unor adîncimi mari impune folosirea unor intensități acustice ridicate, acestea nu trebuie să depășească valoarea pentru care se produce fenomenul de cavitație. Pentru frecvențele de lucru menționate mai sus intensitatea maximă este de 2W/cm².

Poziția unde sînt plasate transductoarele joacă un mare rol, datorită faptului că deplasarea navei produce o turbulență a apei care înmulțește numărul bulelor, cauzînd în felul acesta o atenuare sporită a undelor ultrasonice. Pentru a se evita cît mai mult aceste zone, transductoarele se așează pe fundul vasului spre prova sa. În cazul cînd există două transductoare cu funcții diferențiate, distanța dintre ele nu este indicat să fie mai mare de 3 m.

Folosindu-se metoda ultrasonică, adîncimea fundului apei poate fi determinată cu o precizie egală cu $\pm 1\%$. Au putut fi detectate cu aju-

torul ecolotului cele mai mari adâncimi ale Oceanului Pacific, adâncimi care depășesc 11 000 m.

Sondajul ultrasonic permite să se obțină și informații cu privire la natura fundului mării și la sedimentele existente în bazinele de apă. Aceste informații rezultă în urma examinării formei și calității semnalului recepționat.

Cum pe batigramă se trasează în cele mai mici detalii toate neregularitățile fundului mării, ecolotul poate fi folosit și pentru căutarea și identificarea epavelor în regiuni nu prea adânci, în general sub 150 m. Prin asocierea ecolotului cu o cameră de televiziune submarină, eficacitatea operației de descoperire și de identificare a epavelor crește considerabil.

Dacă emițătorul ultrasonic în loc să emită semnale dirijate după verticală are posibilitatea de a se roti într-un plan orizontal și într-un plan vertical, instalația poate fi folosită la detectarea diferitelor obiecte imersate în apă (submarine, mine marine etc.). Localizarea corpului imersat se face măsurându-se unghiul azimutal, unghiul de înclinare și distanța de la emițător la obiect, pe baza măsurării intervalului de timp scurs de la emiterea semnalului pînă la recepționarea semnalului repetat. O asemenea instalație este cunoscută sub denumirea de *sonar*. Pentru a se limita fenomenul de difracție, avînd în vedere dimensiunile relativ reduse ale obiectelor ce se reperează, instalațiile de sonar folosesc frecvențe ceva mai ridicate decît ecoloturile, în jur de 40 kHz. Cu o asemenea instalație pot fi detectate corpuri imersate aflate în jurul punctului de reperaj, pînă la o distanță de aproximativ 2000 m (fig. 5.35).

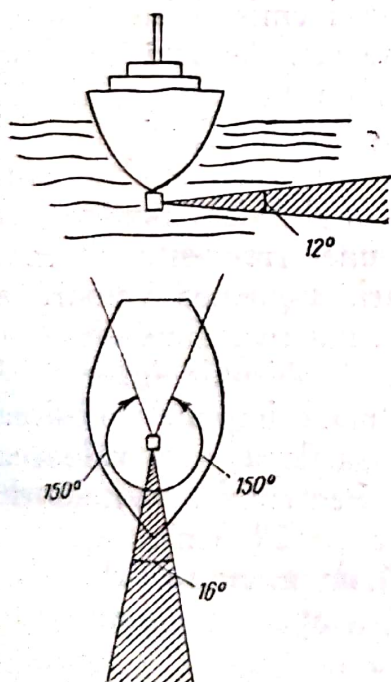


Fig. 5.35. Zona de acțiune a unui sonar.

Reflectarea undelor ultrasonice de către cavitățile de plutire pline cu aer pe care le posedă peștii a permis detectarea cu ajutorul ecolotului sau a sonarului a bancurilor de pești, putîndu-se aprecia prin examinarea batigramei și dimensiunile aproximative ale acestora. Datele obținute sînt cu atît mai precise cu cît peștii înoată mai la suprafața apei și se găsesc în grupuri mai mari și mai compacte.

În mediul submarin ultrasunetele mai sînt folosite și pentru realizarea de comunicații între două nave imersate. În tocmai după cum în telefonia fără fir undele electromagnetice sînt modulate de către vorbire, tot astfel

la un post de emisie sînt modulate și undele ultrasonice. La postul de recepție undele ultrasonice sînt transformate în oscilații, electrice, sînt demodulate și amplificate, putîndu-se auzi într-un difuzor sau la un microreceptor vorbirea transmisă. Se realizează în felul acesta o telefonie ultrasonică, singura în măsură de a efectua legătura dintre două submarine care nu au posibilitatea de a ridica antenele de radio la suprafața apei. Acest sistem de comunicații are avantajul față de alte metode analoge că mesajul transmis nu poate fi interceptat de nave străine, realizîndu-se astfel o comunicație secretă.

Avînd în vedere marele număr de aplicații care se bazează pe propagarea undelor ultrasonice în mediul acvatic a fost creată o ramură nouă a acusticii numită *hidroacustica*.

Totalitatea măsurilor posibile a fi efectuate cu ajutorul ultrasunetelor este arătată în schema din Anexa 2 (p. 309).

5.3.6. Linii de întîrziere cu ultrasunete. Datorită vitezei mult mai mici cu care se propagă undele acustice printr-un gaz, lichid sau solid în comparație cu undele electromagnetice durata străbaterii unei asemenea lungimi de către primele este mult mai mare decît în cazul celei de a doua categorii de unde. Raportul duratelor de propagare este invers proporțional cu vitezele undelor, adică

$$\frac{t_a}{t_e} = \frac{c_e}{c_a}$$

în care indicii a și e definesc parametrii în cazul undelor acustice, respectiv a undelor electromagnetice. În cazul propagării ultrasunetelor prin solide, valoarea raportului este de ordinul 10^{-4} la 10^{-5} .

Existînd așa cum s-a arătat în capitolul 2 și posibilitatea convertirii a unui semnal electric într-unul acustic, precum și a unui semnal acustic într-unul electric, rezultă că se poate introduce într-un circuit electric o întîrziere în propagarea undelor, întîrziere egală cu raportul dintre lungimea mediului și viteza de propagare a undelor acustice prin acel mediu. În felul acesta au putut fi obținute întîrzieri de ordinul sutelor de microsecunde, lucru foarte greu de realizat numai prin utilizarea elementelor electrice. Au fost create linii de întîrziere cu ultrasunete, care își găsesc aplicații în instalațiile de radiolocații, la contorii electrici, la sistemele de televiziune în culori, la mașinile electronice de calculat cu sisteme de memorizare.

La realizarea unei linii de întîrziere trebuie avut în vedere mai mulți parametri printre care se numără: durata întîrzierii ce trebuie obținută, lărgimea bandei de frecvență, atenuarea limită admisibilă. În funcție de acești parametri se alege materialul care constituie mediul de propagare

a undelor ultrasonice. Pentru obținerea unei anumite întârzieri care să nu necesite lungimi prea mari ale liniei, materialul trebuie astfel ales încât viteza de propagare a undelor longitudinale prin el să fie cât mai redusă. Din acest punct de vedere este preferabil să se folosească aerul ca mediu de propagare. O întârziere de 1 ms se obține pe o lungime de numai 34 cm, așa cum se vede din tabela 5.10. Totuși nu se realizează linia de întârziere cu aer, datorită inconvenientelor pe care le are acest mediu în ce privește atenuarea undelor și adaptarea la transductor. Din acest motiv singurele medii folosite la liniile cu întârziere sînt cele lichide și solide și numai aceste medii vor fi luate în considerare în cele ce urmează. Ținînd seama că pentru convertirea semnalelor se folosesc în mod obișnuit transductoare piezoelectrice cu cristal de cuarț, coeficientul de transmisie τ în cazul acestor medii este mult mai ridicat decît la gaze.

Tabela 5.10

Mediul	ρ 10 ³ kg/m ³	c m/s	ρc kg/m ² s	Lungimea (cm)		τ
				1 ms	5 ms	
Aer	0,0012	344	414	34	170	0,0002
Apă	1,00	1497	1,50 · 10 ⁶	149,7	750	0,340
Mercur	13,60	1440	1,9 · 10 ⁶	144	720	0,409
Aluminiu	2,7	6320	17,0 · 10 ⁶	632	3160	0,994
Cuarț	2,6	5570	14,5 · 10 ⁶	557	2785	1,000

Mediul utilizat ca linie de întârziere trebuie să prezinte o atenuare mică a undelor ultrasonice pentru a da posibilitatea folosirii de frecvențe cât mai ridicate. Din acest punct de vedere cele mai favorabile materiale sînt metalele cu o granulație fină, iar dintre acestea este de preferat aluminiul pur prin care pot fi transmise unde de ordinul megaherților. Limita frecvenței ce poate fi utilizată la o asemenea linie de întârziere este de aproximativ 6 MHz avînd în vedere că la această frecvență o linie care asigură o întârziere de 1 ms trebuie să aibă o lungime de ~ 500 cm, iar atenuarea corespunzătoare este în jur de 5,4 dB.

Prin utilizarea cuarțului topit se poate ajunge la frecvențe și mai ridicate, cunoscînd că pierderile în acest mediu sînt mai mici decît în aluminiu. Astfel, într-o linie de întârziere de 1 ms, care necesită o lungime de 600 cm, atenuarea la frecvența de 25 MHz este de ordinul a 11,5 dB. Cunoscînd că atenuarea undelor ultrasonice prin mercur se poate calcula cu relația aproximativă

$$\alpha = \frac{0,0045 f^{1/2}}{d} \quad [\text{dB/cm}].$$

unde d este diametrul tubului cu mercur, rezultă că în cazul unei linii de întârziere cu o lungime de 500 cm și diametrul de 2 cm, lucrînd la o frecvență de 10 MHz atenuarea introdusă este de aproximativ 3,5 dB.

Mediul destinat propagării undelor acustice trebuie să asigure o variație cît mai mică a vitezei cu temperatura. În această privință sînt de asemenea de preferat aluminiul și cuarțul topit, la care variațiile vitezelor de propagare a undelor în funcție de temperatură sînt foarte mici. Astfel, în cazul cuarțului topit $c_{100}/c_0 = 3,3 \cdot 10^{-5}$, iar în cazul mercurului un alt mediu, folosit ca linie de întârziere, variația vitezei este de aproximativ $34 \cdot 10^{-5}$ pentru 1 grad centigrad.

Pe lîngă frecvența maximă ce poate fi utilizată, o altă caracteristică a liniei de întârziere este lărgimea benzii de frecvență. Aceasta este definită obișnuit ca lărgimea exprimată în herzi dintre frecvența la care atenuarea undelor este minimă și frecvența la care atenuarea este cu 3 dB mai mare decît valoarea minimă. Această lărgime de bandă este determinată în special de coeficientul de cuplaj al transductorului și de natura peliculei de cuplaj. Ea determină durata impulsului Δt , cunoscînd că între cele două mărimi există relația

$$\Delta t = \frac{1,4}{\Delta f}.$$

De exemplu, în cazul unui transductor avînd un factor mecanic $Q_m = 2$, care radiază la frecvența de 4 MHz, lărgimea benzii de frecvență este de 2 MHz, iar durata impulsului este egală aproximativ cu $0,7 \mu s$.

Dacă se impune a fi înmagazinate impulsuri mai scurte de $0,1 \mu s$ este necesar ca linia de întârziere să aibe o lărgime de bandă de cel puțin 14 MHz. Asemenea impulsuri pot fi înmagazinate într-o linie care folosește ca mediu de propagare cuarțul topit, datorită atenuării mici pe care o asigură. Pierderile reduse de energie acustică în acest mediu s-ar datora conținutului de OH^- , acumulat de cuarț în cursul topirii sale.

Din cele arătate mai sus rezultă că o linie de întârziere răspunde mai bine cerințelor, atunci cînd permite înmagazinarea unor impulsuri cît mai scurte, reproducîndu-se cu o întârziere cît mai mare. Au fost realizate linii de întârziere cu ultrasunete pentru impulsuri de $0,1 \mu s$ și o întârziere de 3 000 μs , asigurînd o înmagazinare de 30 000 biți a informației.

Pentru convertirea semnalelor se folosesc în mod curent transductoare piezoelectrice cu cuarț sau cu titanat de bariu. O problemă importantă este cea a cuplajului dintre transductor și lichidul sau solidul care constituie mediul de propagare al undelor ultrasonice, acest cuplaj realizîndu-se în modul indicat în § 2.4.

Cele mai simple linii de întârziere sînt acelea la care undele ultrasonice parcurg un traseu rectiliniu între cele două transductoare. Asemenea linii sînt destul de scurte și nu pot asigura o întârziere prea mare. Ele sînt folosite pe scară largă în sistemul de televiziune color adoptat de unele țări europene (SECAM), durata întârzierii realizate fiind de ordinul a $60\mu s$, ca mediu de propagare a undelor fiind sticla. Ateenuarea introdusă de 10 dB este considerată ca suficient de mică pentru această aplicație.

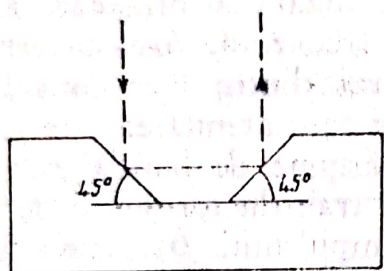


Fig. 5.36. Linie de întârziere cu reflexii multiple.

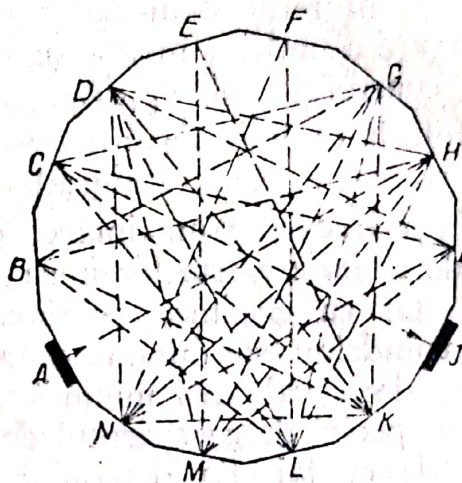


Fig. 5.37. Linie de întârziere cu contur poligonal.

În scopul obținerii unei durate de întârziere mai mari, de ordinul a $1\,000\mu s$, fără ca totuși dimensiunile dispozitivului să devină exagerat de mari, au fost realizate linii de întârziere cu contur poligonal. La acestea lungimea traseului se obține prin reflexiile multiple ale undei în propagarea ei între cele două transductoare. O formă simplă este cea indicată în fig. 5.36, la această linie reflexiile undei producându-se pe fețele corpului care constituie mediul de propagare înclinate la 45° . Dispozitivul creat de D. L. Arenberg, care constă dintr-un cristal cu secțiunea poligonală avînd 15 laturi, asigură 31 trasee ale impulsului (fig. 5.37). Diametrul cercului circumscris poligonului regulat este de aproximativ 12 cm, dispozitivul permițînd realizarea unei întârzieri de aproximativ $1\,000\mu s$. Mărindu-se diametrul la circa 42 cm, s-au putut obține întârzieri de ordinul a $3\,300\mu s$.

Pentru unele necesități practice au fost create linii de întârziere variabile. Ca mediu de propagare pentru undele acustice se folosește obișnuit cuarțul topit iar ca formă dispozitivele pot fi rectilinii sau poligonale.

În principiu un astfel de dispozitiv este alcătuit dintr-un suport 1 și un cursor 2, care poate aluneca de-a lungul unei suprafețe a suportului (fig. 5.38, a). Transductorul emițător 3 se găsește montat pe o față a suportului iar transductorul receptor 4 este montat de cursor. Prin

modificarea poziției cursorului se variază distanța dintre cele două transductoare și prin aceasta mărimea traseului undei ultrasonice, deci durata de întârziere. Pentru a se obține valori cât mai mari ale duratei de întârziere se construiesc dispozitive cu două sau mai multe suporturi și cu un cursor care le cuprinde pe toate, servind numai la reflectarea undei acustice, ambele transductoare fiind montate la suport. Deplasarea cursorului se poate face manual sau cu ajutorul unui motor.

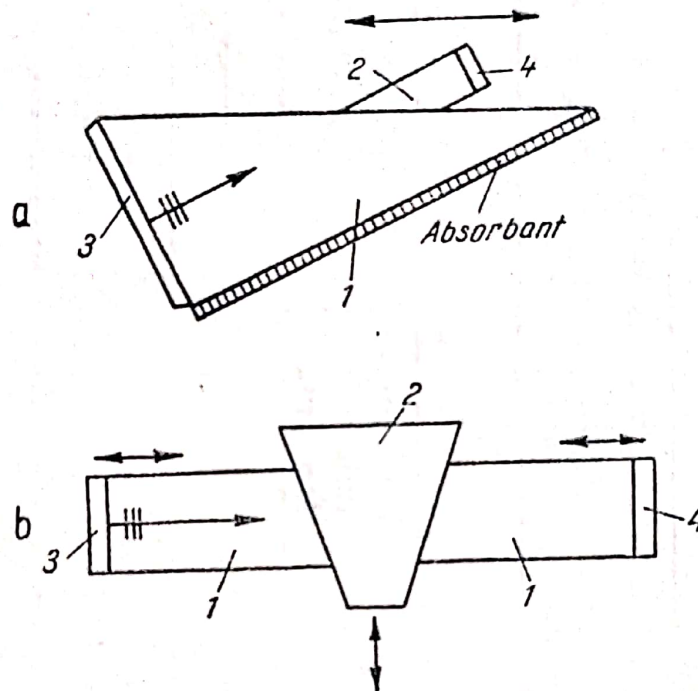
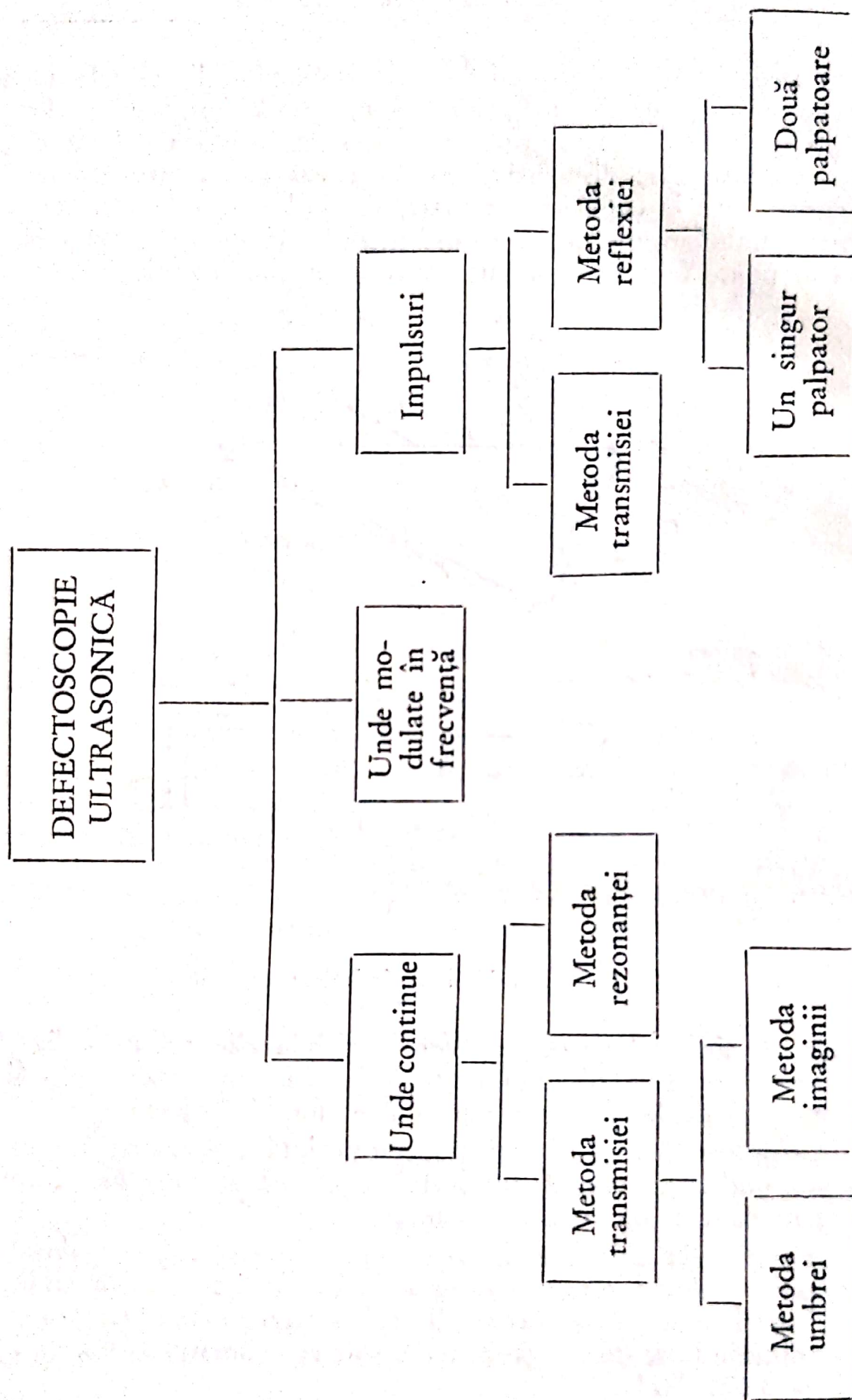


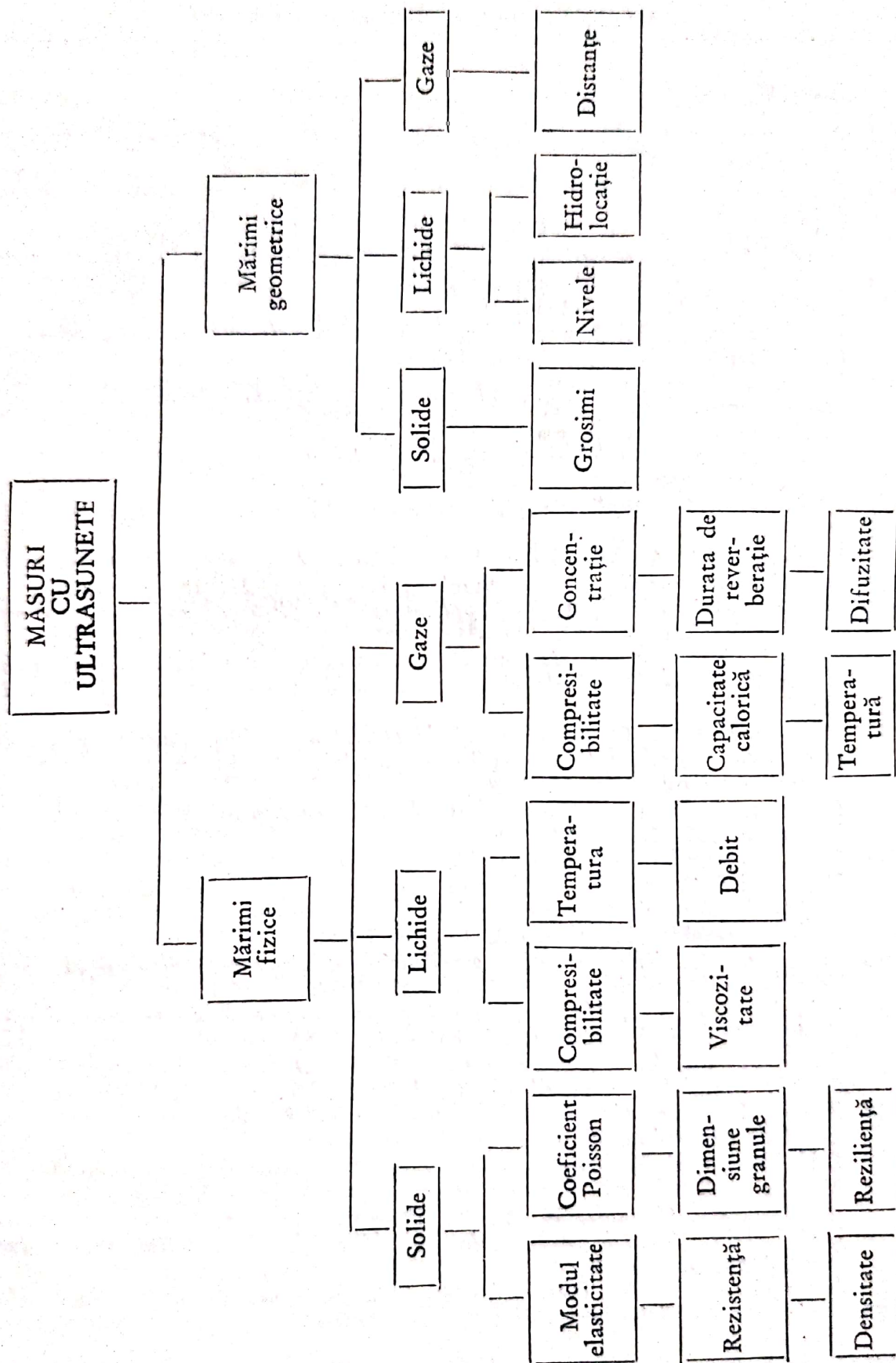
Fig. 5.38. Linii de întârziere variabile.

Un alt tip de linie de întârziere variabilă este arătat în fig. 5.38, *b*. La acest dispozitiv, distanța dintre cele două transductoare 3 și 4 este variată prin deplasarea unui cursor 2 în formă de pană.

În scopul reducerii cât mai mult cu putință a atenuării care are loc la trecerea undei din corpul suportului în cursor, se introduce între suprafețele în contact un lichid de cuplaj.

La liniile de întârziere descrise mai înainte se folosesc obișnuit unde ultrasonice având frecvența cuprinsă în banda 0,25 ... 100 MHz. Pentru cazuri speciale au fost construite linii de întârziere care lucrează cu micro-unde, obținându-se durate de întârziere de aproximativ $10 \mu s$, cu frecvențe până la 3 000 MHz.





BIBLIOGRAFIE

1. Rosenberg, L. D. ș.a., *Ultrazvucovoe rezanie*, Izdatelstvo Akademii Nauk, SSSR, Moscova, 1962.
2. Mason, W. P., *Physical Acoustics*, vol. I., partea B, Academic Press, New York, 1964.
3. Rosenberg, L. D., Iahimovici, D. P., *Ultrazvukovoi sposov obrabotki tverdiĥ i hrupkih materialov*, Vestnik mašinostroeniia, 39, 2, 51—55, 1959.
4. Neppiras, E. A., *The mechanism of ultrasonic drilling*, Metalworking Production, 100, 28, 1333—1336, 1956.
5. Metelkin, V. V., Metelkin, I. V., *Fiziceskie osnovi ultrazvukovoi obrabotki*, Mašinostroitel, 10, 9—10, 1958.
6. Kogan, M. G., Tuzlukova, V. A., *Mașină pentru prelucrarea cu ultrasunete a materialelor dure*, Buletinul construcțiilor de mașini, 11, 61—63, 1959 (traducere din „Vestnik mašinostroeniia”, 11, 1959).
7. Markov, A. I., *Ultrazvukovaia obrabotka tverdiĥ materialov*, Mašinostroitel, 10, 10—21, 1958.
8. Pignet, J. L., *Applications des ultrasons*, Révue de Métallurgie, 54, 737—754, 1957.
9. Voronin, A. A., Markov, A. I., *Vliianie ultrazvukovih kolebanii na proțess rezaniia jaroprocinih splavov*, Stanki i instrument, 31, 15—17, 1960.
10. Hermandinquer, R., *Les applications des ultrasons en métallurgie et mécanique*, Mécanique, 40, 92, 309—313, 1965.
11. Vladimirov, A. I., *Isledovanie ultrazvukovoi obrabotki tverdiĥ i hrupkih materialov*, Izvestiia vısshih ucbenih zavedenii, Priborostroenie, 4, 2, 122—129, 1961.
12. Markov, A. I., *O metodă nouă de mărire a productivității la prelucrarea cu ultrasunete*, Buletinul Construcțiilor de mașini, 12, 31—33, 1958 (traducere din Vestnik mašinostroeniia, 12, 1958).
13. Livșit, A. L. ș.a., *Universalnii ultrazvukovoi proșivocinii stanok*, Stanki i instrument, 30, 6, 10—12, 1959.
14. * * * *Ultrasonics and grinding*, New Scientist, 238, 583, 1961.
15. Voronin S. A. ș.a., *Influența vibrațiilor ultrasonice din timpul ascuțirii asupra durabilității cuțitelor*, Mașini, unelte și sculte, 4, 211—213, 1961 (traducere din Stanki i instrument 2, 14—16, 1961).
16. Mattiat, O., *The processing possibilities of ultrasonics*, Journal of the Acoustical Soc. of America, 26, 2, 241—243, 1954.
17. Hiedemann, E., *Metalurgical effects of ultrasonics waves*, Journal of Acoustical Society of America, 26, 5, 831—842, 1954.
18. Rosenberg, L. D., Kazanțev, V. F., *O fizike ultrazvukovoi obrabotki tverdiĥ materialov*, Dokladi Akademii Nauk S.S.S.R., 124, 1, 79—82, 1959.
19. Kops, L., *Suspensia abrazivă și indicatorii tehnologici ai găuririi ultrasonice*, Lucrările simpozionului de aplicarea ultrasunetelor de la Bratislava, 1962.
20. Dickinson, T. R., *Ultrasonic machining of ceramics*, Ceramic age, 15—17, 1954.
21. Kelley, S. G., *Hard brittle materials machined using ultrasonic vibrations*, Materials and Methods, 34, 92—94, 1951.
22. Lehfeldt, W., *Die Arbeitsweise der Ultraschall — Bohrmaschine*, Industrieblatt, 1955, p. 119—122.
23. Neppiras, E. A., *Ultrasonics in Industry Research*, 6 (1953) p. 271—282.
24. Spitzig, S., *Schneiden mit Ultraschallschwingungen*, Werkstattstechn. Maschinen Bau 45 (1955), p. 15—18.
25. Seidl, F., *Besondere Eigenschaften und Wirkungen des Ultraschalls*, Physikalische Blätter, (1962), nr. 5, p. 207—215.

26. Olaf, I., *Oberflächenreinigung mit Ultraschall*. *Acustica*, 7, (1957), nr. 5, p. 253—263.
27. Gollmick, H., *Heutiger Stand der Ultraschall-Behandlung von Fest körper-Oberflächen*. *Das Industrieblatt*, 59 (1959) nr. 5, p. 200—204.
28. Gherasimov, A. G., *Mehanizirovanii agregat dlea ultrazvukovoi ocistki koleť podšipnikov kaceniia*. *Vestnik mašinostroeniia*, 39, (1959), nr. 11, p. 32—37.
29. Wenk, P., *Die Anwendung des Ultraschalls bei der Oberflächen bearbeitung von Metallen*. *Metalloberfläche*, 10, (1956), nr. 9, p. 257—260.
30. Neppiras, E. A., *Nekotorie voprosi tehniki ultrazvukovoi ocistki*. *Akusticeski jurnal* 8, (1962), nr. 1, p. 3—16.
31. Bebcuk, A. S., *K voprosu o kavitationnom razrušeni tverdih tel*, *Akusticeski jurnal*, 3, (1957), nr. 1, p. 90—91.
32. Faese, H., *Reinigen und Entfetten von Werkstücken durch Ultraschall*. *V.D.I. Zeitschrift*, 100, (1958), nr. 3, p. 92—93.
33. Lehfeldt, W., *Reinigen durch Ultraschall*. *Zeitschrift für Wirtschaftliche-fertigung*, 34, (1959), nr. 10, p. 287—292.
34. * * * *Décapage et nettoyage ultrasonores*. *L'électricité Moderne*, 30 (1960), nr. 127, p. 12—15.
35. Rosenberg, L. D., *On the physics of ultrasonic cleaning*. *Ultrasonic News* 4, (1960), nr. 4, p. 16—20.
36. Pohlman, R., *Die Ultraschallreinigung innerer und äusserer Oberflächen mit dem Resonanzverfahren*. *Metall-Zeit schrift für Technik, Industrie und Handel*, 11, (1957), nr. 6, p. 508—511.
37. Lehfeldt, W., *Ultraschall-Reinigung von Massenteilen*. *Blech*, 6, (1959), nr. 9, p. 430—434.
38. Gollmick, H., *Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des Ultraschall-Reinigungs-verfahrens*. *Metall Reinigung*, 7, (1958), nr. 5, p. 91—94.
39. Kearney, T. J., *Uses of ultrasonics in degreasing processes*. *J. of the Acoustical Soc. of America*, 26, (1954), nr. 2, p. 244—246.
40. Urban, S., *Folosirea energiei ultrasonice pentru curăţirea sistemelor cu semiconductori*. *Simpozionul Aplicaţiile ultrasunetelor*. Bratislava, 1962.
41. Makarov, L. O., Rosenberg, L. D., *O mehanisme ultrazvukovoi ocistki*, *Akusticeski jurnal*, 3, (1957), nr. 4, 374—376.
42. Wenk, P., Nündel, U., *Reinigen und Entfetten von Werkstücken durch Ultraschall*. *Siemens Zeitschrift*, 34, (1956), p. 135—138.
43. Samsel, R. W., *Some industrial applications of ultrasonics*, *Acustica*, 4, (1954), nr. 4, p. 208—211.
44. Gherşgal, D. A., Fridman, V. M., *Aparate cu ultrasunete*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1962.
45. Gorev, K. V. *ş.a.*, *Kristalizacia magnievogo ciuguna pod deistviem ultrazvuka*. *Liteinoe hozeaistvo*, (1961), nr. 4, p. 35—36.
46. Hermandinquer, P., *Les applications des ultrasons en métallurgie et en mécanique*. *Revue générale de mécanique*, (1956), nr. 92, p. 309—313.
47. Alftan, E. A., *Vliianie uprugih kolebanii zvukovoi i ultrazvukovoi ceastoti na prevašeniia v metallah i splavah*. *Metallovedenie i termiceskaia obrabotka metallov* (1959), nr. 1, p. 31—39.
48. Matiat, O., *The Processing Possibilities of Ultrasonics*. *Journal of the Acoustical Soc. of America*, 26, (1954), nr. 4, p. 241—243.
49. Hiedemann, E. A., *Metallurgical Effects of Ultrasonic Waves*. *Journal of the Acoustical Soc. of America* 26, (1954), nr. 8, p. 831—842.
50. Seeman, H. J., Staats, H., *Vibration Treatement of Metals*. *Journal of the Acoustical Soc. of America*, 29, (1957), nr. 6, p. 698—701.

123. Haris, J. G., Crowter, J., *The Use of Ultrasonic Testing for the Control of Quality in the Manufacture of Aluminium Alloys and other non-ferrous Materials*. The Journal of the Institute of Metals 86, (1958), nr. 5, p. 193—206.
124. Bernath, A., *Cîteva probleme ale controlului ultrasonic al osiilor de vagoane de cale ferată*. Simpozionul Aplicațiile ultrasunetelor. Bratislava, 1962.
125. O obraz, J., *Compensarea variațiilor cuplării acustice întresondă și piesa examinată ultrasonic*. Simpozionul Aplicațiile ultrasunetelor. Bratislava, 1962.
126. Bernath, A., *Defectoscopia ultrasonică în industria metalurgică și a construcțiilor de mașini*. Caietele Comisiei de acustică a Academiei R.S.R., nr. 6, 1965, p. 3—36.
127. Guțanu, M. ș.a., *Tipurile defectelor depistate cu ajutorul ultrasonic aplicat la semifabricate și piese finite de la instalațiile de foraj*, Caietele Comisiei de acustică a Academiei R.S.R., nr. 6, 1965, p. 37—56.
128. Băltănoiu, M. ș.a., *Cercetări privind sensibilitatea controlului cu ultrasunete al unor laminate folosind defecte artificiale*. Caietele Comisiei de acustică a Academiei R.S.R., nr. 6, 1965, p. 57—74.
129. * * * *Ultrazvuk v stroitelnoi tehnike*, Gos. Izd. literat, po stroitelstvu, Moscova, 1962.
130. Sawczuk, A., Filipcinski, A., *Ultrazvukovoi impulsnoi metod kontrolea kacestva betona*. Beton i jelezobeton (1958), nr. 2, p. 45—52.
131. Javor, T., *Kontrola kvality betonu ultrazvukom*, Stavivo, (1959), nr. 1, p. 19—21.
132. Sawczuk, A., *Application of ultrasonic technique to concrete quality testing*. Proceedings of the II Conference on ultrasonics, Warszawa, 1957, p. 201—207.
133. Kaplan, F., *The Effect Age and Water-cement Ratio upon the Relation between Ultrasonic Pulse Velocity and Compressive Strength of Concrete*. Magazine of Concrete Research, 11, (1959), nr. 32.
134. Nogin, S. I., *Issledovanie ultrazvukom narușenii strukturî betona pod deistviem nagruzki*. Beton i jelezobeton (1960), nr. 11.
135. Făcăoaru, I., *Cercetări cu ultrasunete pentru constatarea și remedierea unor defecte în construcții*. Revista construcțiilor și materialelor de construcții, 10 (1958), nr. 10, p. 480—487.
136. Făcăoaru, I., *Probleme speciale ale încercării betonului armat cu ultrasunete*. Revista construcțiilor și materialelor de construcții, 12, (1960), nr. 5.
137. Gotthard, F., *Neuere Methoden und Ergebnisse der Werkstoffprüfung bei Stahlbeton*. Betonstein Zeitung, 5 (1959), nr. 12, p. 45—50.
138. Baranov, A. T., Bahtiarov, K. I., *Issledovanie iaceistogo betona zvu-kovîmi metodami*, Beton i jelezobeton, (1960), nr. 10.
139. Ahverdov, I. N., Salimo, M. A., *Vlianie vibrații i ultrazvukovîh kolebanii na formiravanie strukturî žementnogo kamnia*. Beton i jelezobeton, (1960), nr. 9.
140. Făcăoaru, I., *Beitrage zur Anwendung der Ultraschallwellen für die Kontrolle der Betongüte*. Lucrările celei de a doua conferințe de acustică. Budapesta 1961, vol. I, p. 5/1—5/4.
141. Făcăoaru, I., *Aplicarea metodelor ultrasonice în industria construcțiilor*. Caietele Comisiei de Acustică a Academiei R.S.R., nr. 7, 1965, p. 3—16.
142. * * * *Normativ condiționat pentru încercarea betonului cu ultrasunete*. C. 26—62, București, 1962.
143. Făcăoaru, I., *Experiența aplicării normelor românești provizorii pentru încercarea betonului cu ultrasunete*. Caietele Comisii de acustică a Academiei R.S.R., nr. 7, 1965.
144. Făcăoaru, I., ș.a., *Cercetări privind folosirea măsurătorilor*.

145. Avram, C. N., ș.a., *Studiul întăririi pietrei de ciment vibrată și revibrată, cu ajutorul ultrasunetelor*. Caietele Comisiei de Acustică a Academiei R.S.R., nr. 7, 1965, p. 17—34.
146. Avram, C. N., ș.a., *Studiul întăririi betoanelor vibrată și revibrată, cu ajutorul ultrasunetelor*. Caietele Comisiei de Acustică a Academiei R.S.R., nr. 7, 1965, p. 35—48.
147. Koltonski, W., și Malecki, I., *Ultrasonic Method for the Exploration of the Properties and Structure of Mineral Layers*, *Acustica*, 8 (1958), nr. 5, p. 307—314.
148. Saveliev, V. I., *Ispolzovanie ultrazvuka v inženerno-gheologhiceskih iziskanii ab dlea ghidrotehniceskogo stroitelstvo*. Ghidrotehnicesko stroitelstvo, 28 (1959), nr. 6, p. 22—25.
149. Wehr, J., *Ultradźwiękowe metody pomiarout stalijch sprężystosci*. Pomyarł Automatijka Kontiala (1963), nr. 1, p. 30.
150. Ageeva, N. S., *Izmerenie akusticeskih parametrov materialov na ultrazvukovih ciastotah pri pomoși impulsnoi trubî*. Akusticeski jurnal I (1955), nr. 2, p. 110—120.
151. Greenspan, M., și Tshiegg, C. E., *Sing around Ultrasonic Velocimeter for Liquids*. Rev. Sci. Instruments, 28, (1957), nr. 11, p. 897—901.
152. Isaev, A. A., Himunin, A. S., *Ultrazvukovoi plotnomer*. Akusticeski jurnal, VIII, (1962), nr. 3, p. 308—313.
153. Dunegan, H. L., *Grain Size Measurements to Uranium by Use of Ultrasonics*. Materials evaluation, 1964, p. 353—359.
154. Andreac, J. H., Joyce, P. L., *30 to 23 Megacycle Pulse Fechnique for Ultrasonic Absorbtion Measurement in Liquids*. British Journal of Applied Physics, (1962), nr. 9, p. 462.
155. Berdiev, A. A., Lejnev, N. B., *K voprosu ob izmerenii pogloșcenia ultrazvuka v jidcostiah*. Akusticeski jurnal, IX, (1963), nr. 1, p. 113.
156. Blume, R. J., *Instrument for Continous High Resolution Measurement of Changes in the Velocity of Ultrasound*. Revue of Scientifique Instruments, (1963), nr. 12, p. 1400.
157. Eleventh, J. H., *A Survey of Ultrasonic Delay Lines Operating below 100 Mc/s*. Proceedings of the IEEE, 53 (1965), nr. 10, p. 1406—1428.
158. Rodrigue, G. P., *Microwave Solid-State Delay Lines*. Proceedings of the IEEE, 53 (1965), nr. 10, p. 1428—1437.

Redactor responsabil: NATALIA FIUCIUC
 Tehnoredactor: ELENA GERU și VALERIU MORĂRESCU

Dat la cules 15.12.1966. Bun de tipar 30.03.1967, Apărut 1967.
 Tiraj 1.800+140+30 legate. Hirtie scris I A de 70 g/m²,
 610×860/16. Coli editoriale 21,10. Coli de tipar 19,75.
 A. 19205/1966. C. Z. pentru bibliotecile mari 534.321.9:62—868.8.
 C. Z. pentru bibliotecile mici 534.

Tiparul executat la Intreprinderea poligrafică Sibiu,
 str. N. Bălcescu nr. 17 — Republica Socialistă România